



PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **09237291 A**(43) Date of publication of application: **09.09.97**

(51) Int. Cl

G06F 17/50(21) Application number: **08340745**(22) Date of filing: **20.12.96**(30) Priority: **28.12.95 JP 07342695**(71) Applicant: **FUJITSU LTD**(72) Inventor: **OTSU SHINICHI
MUKAI MAKOTO**

(54) **ELECTROMAGNETIC FIELD INTENSITY
CALCULATION DEVICE AND
ELECTROMAGNETIC FIELD INTENSITY
CALCULATION METHOD**

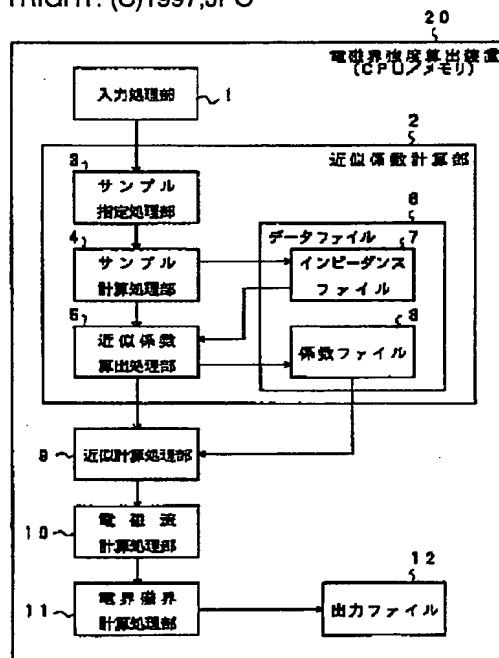
calculates an electric field and a magnetic field by using the current value.

COPYRIGHT: (C)1997,JPO

(57) Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To calculate electromagnetic field intensity emitted by an electric circuit device at high speed while maintaining high precision.

SOLUTION: A sample calculation processing part 4 calculates mutual impedance in a sampling frequency without using an approximate expression. An approximate coefficient derivation processing part 5 calculates an approximate coefficient with an LU analysis method in accordance with the approximate expression that is constituted of the polynomial of the frequency, which is expressed by the approximate coefficient and the frequency, and that shows mutual impedance. An approximate calculation processing part 9 calculates the mutual impedance in the designated frequency with the approximate expression by using the approximate coefficient. An electromagnetic flow calculation processing part 10 calculates a current value flowing in respective elements by using the mutual impedance. An electromagnetic field calculation processing part 11



THIS PAGE BLANK (USPTO)

(51) Int.Cl.⁹
G 0 6 F 17/50

識別記号 庁内整理番号

F I
G 0 6 F 15/60

技術表示箇所

6 6 6 Z
6 1 2 H

審査請求 未請求 請求項の数7 O L (全 36 頁)

(21) 出願番号 特願平8-340745

(22) 出願日 平成8年(1996)12月20日

(31) 優先権主張番号 特願平7-342695

(32) 優先日 平7(1995)12月28日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号

(72) 発明者 大津 信一

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(72) 発明者 向井 誠

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(74) 代理人 弁理士 森田 寛 (外1名)

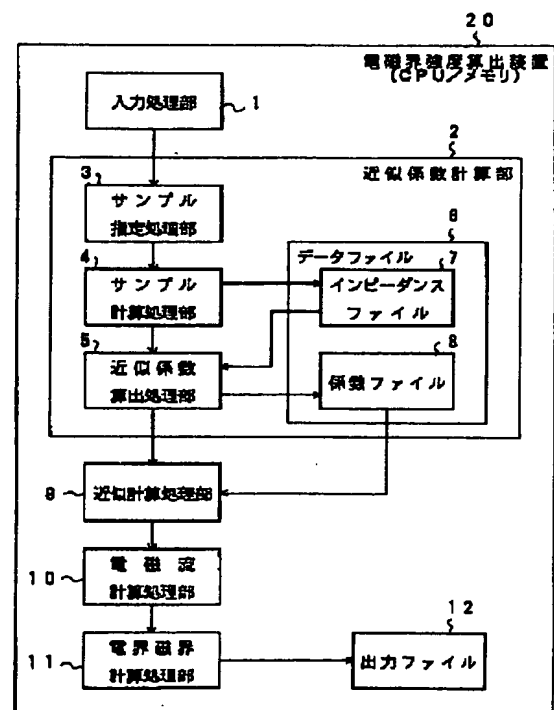
(54) 【発明の名称】 電磁界強度算出装置及び電磁界強度算出方法

(57) 【要約】

【課題】 本発明は、電磁界強度算出装置に関し、電気回路装置の放射する電磁界強度を高精度を維持しつつ高速で算出することを目的とする。

【解決手段】 サンプル計算処理部4はサンプリング周波数における相互インピーダンスを近似式を用いずに算出する。この相互インピーダンス及びサンプリング周波数を用いて、近似係数算出処理部5は、近似係数と周波数とで表された周波数の多項式からなる相互インピーダンスを表す近似式に従って、近似係数をLU分解法によって算出する。この近似係数を用いて近似計算処理部9は指定された周波数における相互インピーダンスを前記近似式により算出する。この相互インピーダンスを用いて、電磁流計算処理部10は各要素を流れる電流値を算出する。この電流値を用いて電界磁界計算処理部11は電界及び磁界を算出する。

電磁界強度算出装置構成図



1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 電気回路装置の放射する電磁界強度を算出する電磁界強度算出装置において、

相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全てについて、近似係数と周波数のべき乗との積の多項式で表された近似式であって当該周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを表す近似式における複数の近似係数を、当該近似式からなる連立方程式をLU分解法を用いて解くことによって算出する近似係数計算部と、

前記近似係数計算部が算出した複数の近似係数を用いて、前記近似式に従って、指定された周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全ての近似値を算出する近似計算処理部と、

前記近似計算処理部が算出した近似値を用いた所定の計算によって、各要素を流れる電流の値を算出する電磁流計算処理部と、

前記電磁流計算処理部が算出した複数の電流値を用いた所定の計算によって、電界及び磁界を算出する電界磁界計算処理部とを備えることを特徴とする電磁界強度算出装置。

【請求項2】 前記近似係数計算部はサンプル計算処理部と近似係数算出処理部とからなり、

前記サンプル計算処理部は、複数のサンプリング周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全てを、前記近似式を用いない所定の計算によって算出し、

前記近似係数算出処理部は、前記サンプル計算処理部が算出した複数の相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクション及び複数のサンプリング周波数を用いて、前記近似式からなる連立方程式をLU分解法によって解くことによって、複数の近似係数を算出し、前記近似計算処理部は、前記近似係数算出処理部が算出した複数の近似係数を用いて近似値を算出することを特徴とする請求項1に記載の電磁界強度算出装置。

【請求項3】 相互インピーダンス Z_{ij} についての前記近似式は、周波数を f 、波数を k （但し、 $k=2\pi f/c$ 、 c は光速）、距離を r 、 j を虚数、近似係数を a_0 、 a_1 、 \dots 及び b_0 、 b_1 、 \dots とする時、 $Z_{ij}=\exp(-jkr)[a_0+a_1f^2+a_2f^4+a_3f^6+a_4f^8+\dots+j(b_0/f+b_1f+b_2f^3+b_3f^5+b_4f^7+\dots)]$ であることを特徴とする請求項2に記載の電磁界強度算出装置。

【請求項4】 相互アドミッタンス Y_{ij} についての前記近似式は、周波数を f 、波数を k （但し、 $k=2\pi f/c$ 、 c は光速）、距離を r 、 j を虚数、近似係数を a_0 、 a_1 、 \dots 及び b_0 、 b_1 、 \dots とする時、 $Y_{ij}=\exp(-jkr)[a_0+a_1f^2+a_2f^4+a_3f^6+a_4f^8+\dots$

2

$+j(b_0/f+b_1f+b_2f^3+b_3f^5+b_4f^7+\dots)]$ であることを特徴とする請求項2に記載の電磁界強度算出装置。

【請求項5】 相互リアクション B_{ij} についての前記近似式は、周波数を f 、波数を k （但し、 $k=2\pi f/c$ 、 c は光速）、距離を r 、 j を虚数、近似係数を c_0 、 c_1 、 \dots 及び d_0 、 d_1 、 \dots とする時、 $B_{ij}=\exp(-jkr)[c_0+c_1f^2+c_2f^4+c_3f^6+c_4f^8+\dots+j(d_0f+d_1f^3+d_2f^5+d_3f^7+d_4f^9+\dots)]$ であることを特徴とする請求項2に記載の電磁界強度算出装置。

【請求項6】 電気回路装置の放射する電磁界強度を電磁界強度算出装置によって算出する電磁界強度算出方法において、

近似係数と周波数のべき乗との積の多項式で表された近似式であって当該周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを表す近似式の実数部の項数及び虚数部の項数と等しい数のサンプリング周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全てを、前記近似式を用いない所定の計算によって算出する処理と、

複数のサンプリング周波数と算出された複数の相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションとを用いて、前記近似式からなる連立方程式をLU分解法によって解くことにより、複数の近似係数を算出する処理と、

算出された複数の近似係数を用いて、前記近似式に従って、指定された周波数の各々における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全ての近似値を算出する処理と、算出された近似値を用いてモーメント法の連立方程式を構成し、各要素を流れる電流の値を算出する処理と、算出された複数の電流値を用いた所定の計算によって電界及び磁界を算出する処理とからなることを特徴とする電磁界強度算出方法。

【請求項7】 電気回路装置の放射する電磁界強度を電磁界強度算出装置によって算出する電磁界強度算出方法において、

複数のサンプリング周波数について実行される第1の処理と、

前記第1の処理の後にシミュレーションの範囲として入力された周波数範囲内の所定の周波数について繰り返し実行される第2の処理とからなり、

前記第1の処理は、近似係数と周波数のべき乗との積の多項式で表された近似式であって当該周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを表す近似式における複数の近似係数を、前記近似式からなる連立方程式をLU分解法によって解くことにより算出する処理であって、

前記近似式からなる連立方程式の一部を解いて近似係数算出の中間結果を算出する前処理と、
前記前処理の後に繰り返し実行される処理であって、前記中間結果と当該周波数における相互インピーダンス、相互アドミタンス及び相互リアクションとを用いて、複数の近似係数を算出する処理とからなり、
前記第2の処理は、所定の周波数の各々における相互インピーダンス、相互アドミタンス及び相互リアクションのいずれか又は全ての近似値を用いて、所定の周波数における電界及び磁界を算出する処理であって、
算出された複数の近似係数を用いて、前記近似式に従って、所定の周波数の各々における相互インピーダンス、相互アドミタンス及び相互リアクションのいずれか又は全ての近似値を算出する処理と、
算出された近似値を用いてモーメント法の連立方程式を構成し、各要素を流れる電流の値を算出する処理と、
算出された複数の電流値を用いた所定の計算によって電界及び磁界を算出する処理とからなることを特徴とする電磁界強度算出方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、電磁界強度算出装置及び電磁界強度算出方法に関し、特に、電気回路装置の放射する電磁界の強度を高精度を維持しつつ高速で算出する電磁界強度算出装置及び電磁界強度算出方法に関する。

【0002】電気回路装置から放射される電波は、テレビやラジオ等の他の電波と干渉することから、最近、各国で厳しく規制されるようになってきた。このような規制の規格として、日本ではVCCI規格があり、米国ではFCC規格があり、ドイツではVDE規格がある。

【0003】このような電波規格を満足させるためには、シールド技術やフィルタ技術等のような種々の技術が用いられる。これらの技術の採用に当たって、当該対策技術がどの程度電波を減少させるかを定量的にシミュレートする必要がある。そこで、高精度で電気回路装置の放射する電磁界強度をシミュレートできる電磁界強度算出装置が必要とされている。

【0004】

【従来の技術】任意形状の物体から放射される電磁界強度は、物体各部に流れる電流が判る場合、公知の理論式を用いて容易に計算することができる。この電流値は、理論的には、マックスウェルの電磁方程式を与えられた境界条件の下で解くことで得られる。しかし、任意形状の物体を対象とした複雑な境界条件の下での解析的な解法は現在知られていない。

【0005】従って、現在の電磁界強度算出装置で用いられている電流を求める解法は、難易の程度の差はあるにせよ、全て近似的なものである。現在、この近似的な解法として、微小ループアンテナ近似法と、分布定数線

路近似法と、モーメント法という3種類のものが知られている。

【0006】微小ループアンテナ近似法は、波源回路と負荷回路との間を接続する配線をループアンテナとして扱い、ループ上の電流は平坦なものと仮定して、この電流を集中定数回路の計算手法で求める方法である。微小ループアンテナ近似法による計算は最も簡単である。しかし、ループの寸法が電磁波の波長に比べて無視できない条件の下では、計算の精度が極めて低下するため、実際には殆ど用いられない。

【0007】分布定数線路近似法は、1次元の構造物として近似できる物体に対して、分布定数線路の方程式を適用することで電流を求める方法である。分布定数線路近似法による計算は比較的簡単であり、また、計算時間及び記憶容量も解析要素数にほぼ比例して増加するに止まり、更に、線路の反射や共振等の現象も含めた解析ができる。従って、1次元の近似が成立する物体については、高精度かつ高速での解析ができる。しかし、分布定数線路近似法には、1次元の構造物として近似できない物体については解析できないという問題点がある。

【0008】モーメント法は、マックスウェルの電磁方程式から導かれる積分方程式の解法の1つであり、3次元の任意形状物体を扱うことができる。具体的には、モーメント法は物体を小さな要素（ワイヤ又はパッチ等）に分割して（メッシュ化して）電流の計算を行う手法である。モーメント法が3次元の任意形状物体を扱い得るため、電磁界強度算出装置においてはモーメント法を用いて電気回路装置の放射する電磁界強度を算出する構成が有力である。

【0009】モーメント法についての参考文献としては、以下のものがある。

【参考文献】H.N.Wang, J.H.Richmond and M.C.Gilreath: "Sinusoidal reaction formulation for radiation and scattering from conducting surface" IEEE TRANSACTIONS ANTENNAS PROPAGATION vol.AP-23 1975

図19は従来の電磁界強度算出装置が実行するモーメント法による電磁界強度算出の処理フローの概略を示す。

【0010】シミュレーションの対象である電気回路装置についてメッシュ化した構造情報を入力データ100として用意した後、入力データ100の読み込み及び構造体と配列の設定を行う(S101)。この後、登録されている全周波数についての処理が終了したか否かを調べる(S102)。未処理の周波数がない場合には処理を終了する。

【0011】未処理の周波数がある場合には次に処理する周波数を1個選択して、当該周波数についての処理を開始する。即ち、3次元の任意形状物体を所定の大きさに分割して得た複数の要素（パッチ）間の各々について、その相互インピーダンス Z_{ij} を所定の計算により求める(S103)。そして、求めた相互インピーダンス

Z_{ij} と構造情報において指定されたモーメント法の波源である電圧値 V_i とをモーメント法の連立方程式に代入して、その解である電流値 I_i を求める(S104)。

【0012】次に、登録されている全観測点についての処理が終了したか否かを調べる(S105)。未処理の観測点がある場合、次に処理する観測点を1個選択して、S105において求めた電流値 I_i が当該観測点に与える電磁界強度(電界 E 及び磁界 H の強さ)を算出し、これを出力データ101として格納し(S106)、この後ステップS105を繰り返す。ステップS105において、未処理の観測点がない場合、ステップS102以下を繰り返す。

【0013】

【発明が解決しようとする課題】EMC電波規制の規格においては、規制周波数帯域内で許容値が規定されている。例えば、日本におけるEMC電波規制の規格であるVCCI規格においては、規制周波数帯域が30MHz～1GHzとされ、この帯域内で許容値が規定されている。

【0014】ところで、図20に示すように、電波規制の対象である電気回路装置の一例として、プリント板102上の伝送線路103が考えられる。伝送線路103はドライバ(出力回路)104の出力をレシーバ(受信回路)105に送る。ドライバ104の出力はパルス状の電圧波形を持つ。従って、実際に伝送線路103から放射される成分には、クロックの基本周波数(f_0)成分以外に、その整数倍の高調波($f_1, f_2, \dots, f_n, \dots$)成分が含まれている。

【0015】このため、電磁界強度算出装置においては、伝送線路103が発生する規制周波数帯域内にある高調波成分についてシミュレーションする必要がある。このようなシミュレーションの結果、図21に示すような電界スペクトラム図が得られる。図21の電界スペクトラム図は電磁界強度算出装置がモーメント法により各周波数について算出した電界強度の集合である。

【0016】しかし、従来の電磁界強度算出装置によって図21の電界スペクトラム図を得るためには、モーメント法による電磁界強度の算出を各周波数(基本周波数成分及び/又は高調波成分の各々)について各々実行しなければならない。即ち、図19に示すように、各周波数毎にS103及びS104を繰り返す必要がある。このため、従来の電磁界強度算出装置が行うシミュレーションによってEMC電波規制の規格を満足するかどうかを判断するためには、極めて長い時間を必要とするという問題があった。特に、図19の相互インピーダンスの計算

(S103)には、その計算量が膨大であるために、極めて長い時間を必要とするという問題があった。

【0017】即ち、従来の電磁界強度算出装置は、いずれもモーメント法における相互インピーダンスを求める計算として周知の処理を実行することにより、「各周波

数毎に」相互インピーダンスを算出する方式を採用する。このため、従来の電磁界強度算出装置は、各周波数毎にかなりの計算量を伴う処理を行わなければならないという問題を生じていた。なお、この問題は、相互インピーダンスに代えて、相互アドミッタンス又は相互リアクションを求める場合においても同様である。

【0018】計算時間の一例を示すと、以下のようである。計算時間はシミュレーションの対象である3次元の物体の形状にもかなり依存する。しかし、概略的な値として、シミュレーションの対象である3次元の物体を1000パッチの要素(サーフェスパッチ)に分割した場合、1個の周波数について図19のステップS103、S104及びS106を1回実行するために数時間を要していた。即ち、図21の電界スペクトラム図における1個のスペクトラムを求めるために数時間を要していた。より具体的には、相互インピーダンスの計算(S103)に数時間、連立方程式の計算(S104)に数分、通常の電界又は磁界の計算(S106)に数分を要していた。

【0019】そこで、本発明者は、先に、近似式を用いて解析対象となる電気回路装置の放射する電磁界強度を算出する電磁界強度算出装置を提案した(特願平7-298062号、平成7年11月16日出願)。この近似式は当該出願において本発明者により始めて導出されたものである。この近似式は、具体的には、近似係数と周波数のべき乗との積の多項式で表された近似式であって、当該周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを表す近似式である。従って、この電磁界強度算出装置は近似式を用いて算出した相互インピーダンス等(近似値)を用いて電磁界強度を算出する。

【0020】この電磁界強度算出装置は周波数の多項式と言う極めて簡潔な形で表される近似式によって各周波数毎に相互インピーダンス等(近似値)を求めることを特徴とする。また、この電磁界強度算出装置は、相互インピーダンス等(近似値)の算出に先立って、相互インピーダンス等を近似式で表すことによって新たに必要となる近似係数算出処理を自動的に行う点においても優れている。

【0021】従って、この電磁界強度算出装置によれば、従来は「各周波数毎」に膨大な量の計算を行うことによって算出されていた相互インピーダンス等について、正確な近似値を高速で算出することができる。この結果、電界及び磁界の強度を算出するための計算量を大幅に削減することができ、処理を極めて高速化することができる。

【0022】ところで、電気回路装置の放射する電磁界強度のシミュレーションは高速であればある程良い。シミュレーションの対象である3次元の物体の情報や規制周波数帯域(シミュレーションすべき周波数帯域)の入

力の完了後、できるだけ速く例えば図 21 の電界スペクトラム図等のシミュレーション結果を得ることが望まれる。従って、電磁界強度算出装置には更なる高速化が求められる。

【0023】そこで、本発明者は、更に特願平 7-298062 号の電磁界強度算出装置について検討した結果、この電磁界強度算出装置を更に高速化することができるを見出した。

【0024】簡単に説明すると、この電磁界強度算出装置の高速化のためには、相互インピーダンス等の算出に先立って近似係数算出処理を自動的に行うことが必須である。この近似係数算出処理は当該近似式からなる連立方程式を解くことによって近似係数を算出する処理である。この連立方程式を解くに際して、本発明者は、相互インピーダンス等が従来のモーメント法において常用される数式ではなく当該近似式で表されることを利用することによって、当該近似式からなる連立方程式が高速で解けることを見出した。

【0025】本発明は、電気回路装置の放射する電磁界強度を高精度を維持しつつ高速で算出する電磁界強度算出装置及びその算出方法を提供することを目的とする。

【0026】

【課題を解決するための手段】図 1 は本発明の原理構成であり、本発明の電磁界強度算出装置を示す。電磁界強度算出装置 20 は、近似式を用いて解析対象となる電気回路装置の放射する電磁界強度を算出する装置である。

【0027】近似係数計算部 2 は、相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全てについて、当該相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを表す近似式における複数の近似係数を、当該近似式からなる連立方程式を LU 分解法を用いて解くことによって算出する。この近似式は、近似係数と周波数のべき乗との積の多項式で表された近似式であって、当該周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを表す。

【0028】近似係数計算部 2 はサンプル計算処理部 4 と近似係数算出処理部 5 とを備える。サンプル計算処理部 4 は、複数のサンプリング周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全てを、近似式を用いない所定の計算によって算出する。近似係数算出処理部 5 は、サンプル計算処理部 4 が算出した複数の相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクション及び複数のサンプリング周波数を用いて、当該近似式からなる連立方程式を LU 分解法を用いて解くことによって、複数の近似係数を算出する。

【0029】近似計算処理部 9 は、近似係数計算部 2 又は近似係数算出処理部 5 が算出した複数の近似係数を用いて、前記近似式に従って、指定された周波数における

相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全ての近似値を算出する。電磁流計算処理部 10 は、近似計算処理部 9 が算出した相互インピーダンス等の近似値を用いた所定の計算によって、各要素を流れる電流の値を算出する。電磁流計算処理部 10 が実行する所定の計算処理は、例えばモーメント法の連立方程式を構成し、これを解く処理である。電界磁界計算処理部 11 は、電磁流計算処理部 10 が算出した複数の電流値を用いた所定の計算によって、電界及び磁界を算出する。

【0030】本発明の電磁界強度算出装置 20 は、周波数の多項式と言う極めて簡潔な形で表される近似式によって各周波数毎に相互インピーダンス等を求めると共に、これに先立って、相互インピーダンス等が当該近似式で表されることを利用することによって当該近似式における近似係数を高速で求めることを特徴とする。これにより、「各周波数毎」に膨大な量の計算を行うことによって算出されている相互インピーダンス等についてその計算量を大幅に削減して処理を極めて高速化することができると共に、相互インピーダンス等の算出のための近似式における近似係数を高速で算出して更に処理を高速化することができる。

【0031】相互インピーダンス等を近似式を用いて求める場合、近似式において用いるべき近似係数を算出し近似式を完成する処理が必要となる。そこで、当該近似式からなる連立方程式を解くことによって近似係数を算出する。本発明者は、相互インピーダンス等が従来のモーメント法において常用される数式ではなく当該近似式で表されることを利用することによって、当該連立方程式の解法として LU 分解法を適用できることを見出した。LU 分解法を用いることにより、連立方程式の解法として例えばガウス消去法等の解法を用いる場合よりも、当該近似式からなる連立方程式を高速で解くことができる。

【0032】従って、本発明の電磁界強度算出装置 20 は、「相互インピーダンス等は周波数の多項式と言う極めて簡潔な形で表すことができる」という本発明者の第 1 の知見、及び、「相互インピーダンス等を周波数の多項式の形で表した場合、相互インピーダンス等を電波的に取り扱うことができるので相互インピーダンス等を極めて正確に近似できる」という本発明者の第 2 の知見に基づいて、相互インピーダンス等を正確に高速で算出することに加えて、相互インピーダンス等を周波数の多項式の形で表した場合、「当該近似式からなる連立方程式の解法に第 1 の知見を重ねて適用することにより、近似係数を高速で算出できる」という本発明者の新たな知見に基づくものである。

【0033】なお、LU 分解法それ自体は連立方程式の解法として周知であるが、相互インピーダンス等の算出処理（相互インピーダンス等を表す近似式における近似

係数の算出処理)をLU分解法を用いて実行する処理は本発明において始めて可能となったものである。即ち、相互インピーダンス等は近似式で表し得ること、及び、近似式における近似係数を当該近似式からなる連立方程式を解いて求めることを前提として、これに重ねて、連立方程式が周波数の多項式からなる近似式であることに着目して、始めて可能となったものである。

【0034】以下、本発明の電磁界強度算出装置20によって相互インピーダンスを求め、これに基づいてモーメント法の連立方程式を解いて、電界及び磁界を求める場合について説明する。なお、相互アドミタンス及び相互リアクションを求める場合についても同様である。また、モーメント法の連立方程式以外の方法によって電界及び磁界を求める場合についても同様である。

【0035】本発明の電磁界強度算出装置20において、サンプル計算処理部4が複数のサンプリング周波数における相互インピーダンス Z_{ij} を算出する。この算出は近似式を用いない所定の計算、即ち、モーメント法において常用される周知の計算によって算出する。従って、この値は正確な値である。この相互インピーダンス Z_{ij} を用いて、近似係数算出処理部5は本発明の近似式に従って複数の近似係数をLU分解法により高速で算出する。

【0036】相互インピーダンス Z_{ij} についての近似式は、本発明に従って、 $Z_{ij} = \exp(-jkr) [a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7 + \dots)]$ である。ここで、 f は周波数、 a_0, a_1, \dots は実数部の近似係数、 b_0, b_1, \dots は虚数部の近似係数である。また、 j は虚数単位、 k は $k = 2\pi f/c$ で定められる値(波数)、 r は2個の要素(例えばダイポール)の中心間の距離である。

【0037】相互インピーダンス Z_{ij} の近似式の実数部の項数及び虚数部の項数が共に n 個であるとする。この場合、サンプリング周波数の個数は、近似式の実数部の項数 n 及び虚数部の項数 n に等しい n 個とされる。従って、サンプル計算処理部4は n 個の相互インピーダンス Z_{ij} を算出する。この相互インピーダンス Z_{ij} は、各々、実数部 α_{ij} と虚数部 β_{ij} とからなる。従って、 n 個の実数部 α_{ij} と虚数部 β_{ij} とが既知の値として与えられる。

【0038】近似係数算出処理部5は、 n 個の実数部 α_{ij} の値と n 個のサンプリング周波数とを近似式の実数部に代入することにより、実数部についての n 個の連立方程式を立てる。また、近似係数算出処理部5は、 n 個の虚数部 β_{ij} の値と n 個のサンプリング周波数とを近似式の虚数部に代入することにより、虚数部についての n 個の連立方程式を立てる。そして、近似係数算出処理部5は、これらの連立方程式を解くことによって、実数部の近似係数 a_0, a_1, \dots 及び虚数部の近似係数 b_0, b_1, \dots を求める。

・・・を求める。

【0039】連立方程式を解く処理はLU分解法によって行われる。相互インピーダンス Z_{ij} を近似係数と周波数のべき乗との積からなる多項式で表すことによって、始めて、相互インピーダンス Z_{ij} についての連立方程式を解く処理にLU分解法を適用することができる。これにより、連立方程式を解く処理を簡略化して、高速で近似係数を算出することができる。

【0040】近似計算処理部9は、近似式に従って、相互インピーダンス Z_{ij} の近似値を算出する。この時、近似係数の各々は近似係数算出処理部5によって算出されている。また、周波数は予め指定される。従って、単に近似式の計算をすることにより、何ら複雑で大量の計算をすることなく、相互インピーダンス Z_{ij} の近似値を算出することができる。

【0041】この近似式は前述のように極めて簡潔な形であるので、相互インピーダンス Z_{ij} の近似値を算出する処理は極めて短時間で行うことができる。更に、この過程において、前記連立方程式を解いて近似係数を算出してこの近似式を完成する処理は、LU分解法によって極めて短時間で行うことができる。

【0042】従って、本発明の電磁界強度算出装置20によれば、電界及び磁界の算出に要する時間の大部分を占めていた相互インピーダンス Z_{ij} の算出を極めて短時間で行うことができるので、電磁界強度の算出を極めて短時間で行うことができる。これにより、規制周波数帯域内にある高調波成分についてシミュレーションする場合のように多くの周波数についてシミュレーションする場合でも、電磁界強度の算出を極めて短時間で行うことができる。このため、電磁界強度算出装置20が行うシミュレーションによって、EMC電波規制の規格を満足する可否かを短時間で判断することができる。

【0043】

【発明の実施の形態】

(電磁界強度算出装置の構成の説明)図2は電磁界強度算出装置構成図であり、電磁界強度算出装置20の構成を示す。電磁界強度算出装置20は、近似式を用いて相互インピーダンス等を求め、これを用いてモーメント法の連立方程式を解くことによって、解析対象となる電気回路装置の放射する電磁界強度を算出する装置である。電磁界強度算出装置20は、CPU、メモリ及びメモリ上の電磁界強度算出プログラムからなる。

【0044】入力処理部1は、電磁界強度算出装置20が起動された場合、図外の入力ファイルに格納されている構造情報を読み込んで、構造体と配列の設定を行う。構造情報は、シミュレーションの対象である電気回路装置にモーメント法を適用するための情報であって、当該電気回路装置を複数の要素(サーフェスパッチ又はワイヤ)にメッシュ化するための情報である。

【0045】入力処理部1には電磁界強度の算出のため

の各種のデータが電磁界強度算出装置20の外部から入力される。入力処理部1は、周波数範囲及びシミュレーション（解析）を行うべき周波数が入力された場合、これを取り込んで図外のメモリに格納する。

【0046】周波数範囲はシミュレーションの範囲である。例えば、解析対象の電気回路装置がVCCI規格を満足するかを解析する場合、周波数範囲は規制周波数帯域に等しい30MHz～1GHzとされる。なお、周波数範囲は、EMC電波規制の規格とは無関係に、シミュレーションを行いたい範囲について設定し得る。

【0047】シミュレーションを行うべき周波数は当該周波数における電界及び磁界強度を算出すべき周波数である。例えば、解析対象の電気回路装置の基本クロックの整数倍の周波数であって入力された周波数範囲内にある周波数が、シミュレーションを行うべき周波数とされる。

【0048】シミュレーションを行うべき周波数は、通常、入力された周波数範囲内に多数存在する。そこで、入力処理部1には、例えば解析対象の電気回路装置の基本クロックの周波数が入力される。この基本クロックの周波数に基づいて、入力処理部1は、基本クロック周波数の整数倍であって周波数範囲内にある周波数の全てを算出する。これらの周波数の各々がシミュレーションを行うべき周波数であって、その各々における相互インピーダンスが本発明の近似式を用いて求められる。入力処理部1は算出したシミュレーションを行うべき周波数を図外のメモリに格納する。なお、シミュレーションを行うべき周波数を入力処理部1に直接指定入力しても良い。

【0049】サンプル指定処理部3は、サンプル計算処理部4及び近似係数算出処理部5と共に、近似係数計算部2を構成する。近似係数計算部2はデータファイル6を備える。データファイル6は相互インピーダンスを格納するためのインピーダンスファイル7及び近似係数を格納するための係数ファイル8からなる。

【0050】サンプル指定処理部3は、周波数範囲に基づいて、サンプリング周波数を指定する。このために、サンプル指定処理部3はメモリに格納された周波数範囲を参照する。サンプリング周波数は近似係数を算出するための演算用サンプルである。サンプリング周波数は複数個（ n 個）指定される。この値 n は近似計算処理部9が用いる近似式に応じて定められる。即ち、近似式の実数部及び虚数部の項数 n に等しい値とされる。サンプル指定処理部3は、指定したサンプリング周波数を図外のメモリに格納する。

【0051】サンプリング周波数は周波数範囲の最大値を $(n-1)$ で割った間隔で概略的に略均等に指定される。例えば、周波数範囲が30MHz～1GHzであり、 $n=5$ である場合、5個のサンプリング周波数 f_{s1} 、 f_{s2} 、 f_{s3} 、 f_{s4} 、 f_{s5} が具体的な数値として指

定される。サンプリング周波数 f_{s1} 、 f_{s2} 、 f_{s3} 、 f_{s4} 及び f_{s5} は、各々、30MHz、250MHz、500MHz、750MHz及び1GHzとされる。最も小さいサンプリング周波数 f_{s1} は、完全に均等にした場合の値である0MHzではなく、規制周波数帯域の最小値30MHzとされる。

【0052】但し、サンプリング周波数の間隔の均等性は厳密に要求されるものではない。要するに、近似係数を求めるための連立方程式を立てることができれば良いのであり、その間隔に多少の不均等が生じて、処理上の問題は何ら生じない。

【0053】サンプル計算処理部4は、 n 個のサンプリング周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを算出する。このために、サンプル計算処理部4はメモリに格納された n 個のサンプリング周波数を参照する。相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれを算出するかは、シミュレーションの対象である電気回路装置についてメッシュ化した結果によって定められる。従って、相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全部が計算される。相互インピーダンス等の算出は、近似式を用いない所定の計算、即ち、モーメント法において常用される周知の計算によって行われる。従って、算出される相互インピーダンス等の値は正確な値である。

【0054】相互インピーダンス Z_{ij} を算出する場合、算出される相互インピーダンス Z_{ij} の数は、 i 及び j の値によって定められる2個の要素間の各々について、サンプリング周波数の個数に等しい n 個である。サンプル計算処理部4は算出した相互インピーダンスをインピーダンスファイル7に格納する。なお、相互アドミッタンス及び相互リアクションを算出する場合、このファイルは、各々、アドミッタンスファイル及びリアクションファイルとされる。

【0055】例えば、 $n=5$ であり、5個のサンプリング周波数 f_{s1} 、 f_{s2} 、 f_{s3} 、 f_{s4} 、 f_{s5} が指定されている場合、各サンプリング周波数 $f_{s1} \sim f_{s5}$ における相互インピーダンス $Z_{ij_{s1}} \sim Z_{ij_{s5}}$ が求められる。従って、 i 及び j の値によって定められる2個の要素間の各々について、5個の相互インピーダンス $Z_{ij_{s1}} \sim Z_{ij_{s5}}$ の具体的な数値が求まる。これらの相互インピーダンス $Z_{ij_{s1}} \sim Z_{ij_{s5}}$ は以下のように表される。

$$Z_{ij_{s1}} = \alpha_{ij_{s1}} + j \beta_{ij_{s1}}$$

$$Z_{ij_{s2}} = \alpha_{ij_{s2}} + j \beta_{ij_{s2}}$$

$$Z_{ij_{s3}} = \alpha_{ij_{s3}} + j \beta_{ij_{s3}}$$

$$Z_{ij_{s4}} = \alpha_{ij_{s4}} + j \beta_{ij_{s4}}$$

$$Z_{ij_{s5}} = \alpha_{ij_{s5}} + j \beta_{ij_{s5}}$$

ここで、 α_{ij} は相互インピーダンス Z_{ij} の実数部の値、 β_{ij} は相互インピーダンス Z_{ij} の虚数部の値、 α 及び β の添字である i 及び j は1～ m の範囲の値を取り、モー

メント法のモードの数である。なお、 β の前の j は虚数単位であり、 β の添字である j とは区別される。従って、5個の実数部 α_{ij} と虚数部 β_{ij} とが具体的な数値として得られる。

【0056】近似係数算出処理部5は、サンプル計算処理部4が算出した n 個の相互インピーダンス等及びサンプル指定処理部3が指定した n 個のサンプリング周波数を用いて、本発明の近似式に従って、近似係数をLU分解法により算出する。このために、近似係数算出処理部5は、メモリに格納された n 個の相互インピーダンス等及び n 個のサンプリング周波数を参照する。近似式は、

【0057】相互インピーダンス Z_{ij} についての近似式は、本発明に従って、 $Z_{ij} = \exp(-jkr) [a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7 + \dots)]$ である。ここで、 f は周波数、 a_0, a_1, \dots は実数部の近似係数、 b_0, b_1, \dots は虚数部の近似係数である。また、 j は虚数単位、 k は $k = 2\pi f/c$ で定められる値、 r は2個の要素の中心間の距離である。言うまでもなく、「 a_0 」の項は「 $a_0 \times f^0 = a_0$ 」なる項であり、「 b_0/f 」の項は「 $b_0 \times f^{-1}$ 」なる項である。従って、実数部は周波数の偶数(0, 2, 4, 6, 8, ...)乗に各近似係数を掛けた項の和であり、虚数部は周波数の奇数(-1, 1, 3, 5, 7, ...)乗に各近似係数を掛けた項の和である。

【0058】相互アドミッタンス Y_{ij} についての近似式は、 $Y_{ij} = \exp(-jkr) [a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7 + \dots)]$ である。これは相互インピーダンスと同じ形である。

【0059】相互リアクション B_{ij} についての近似式は、 $B_{ij} = \exp(-jkr) [c_0 + c_1 f^2 + c_2 f^4 + c_3 f^6 + c_4 f^8 + \dots + j(d_0 f + d_1 f^3 + d_2 f^5 + d_3 f^7 + d_4 f^9 + \dots)]$ である。 c_0, c_1, \dots は実数部の近似係数、 d_0, d_1, \dots は虚数部の近似係数である。これは相互インピーダンスと類似の形であり、虚数部の第1項が周波数 f の「-1乗」ではなく周波数 f の「1乗」から開始される点が異なる。

【0060】なお、相互インピーダンス等を上述の近似式により近似できることは、後に詳細に説明する。近似式は予め近似係数算出処理部5にプログラムの形で与え*

$$\begin{aligned}\alpha'_{ij_{s1}} &= a_0 + a_1 f_{s1}^2 + a_2 f_{s1}^4 + a_3 f_{s1}^6 + a_4 f_{s1}^8 \\ \alpha'_{ij_{s2}} &= a_0 + a_1 f_{s2}^2 + a_2 f_{s2}^4 + a_3 f_{s2}^6 + a_4 f_{s2}^8 \\ \alpha'_{ij_{s3}} &= a_0 + a_1 f_{s3}^2 + a_2 f_{s3}^4 + a_3 f_{s3}^6 + a_4 f_{s3}^8 \\ \alpha'_{ij_{s4}} &= a_0 + a_1 f_{s4}^2 + a_2 f_{s4}^4 + a_3 f_{s4}^6 + a_4 f_{s4}^8 \\ \alpha'_{ij_{s5}} &= a_0 + a_1 f_{s5}^2 + a_2 f_{s5}^4 + a_3 f_{s5}^6 + a_4 f_{s5}^8\end{aligned}$$

これらの連立方程式において、相互インピーダンスの実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ の値はサンプル計算処理部4に

*られる。この時、その実数部及び虚数部における項数 n が定められる。例えば、 $n=5$ である場合、相互インピーダンス Z_{ij} についての近似式は、 $Z_{ij} = \exp(-jkr)$

$$[a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7)]$$

とされる。相互アドミッタンス Y_{ij} についての近似式は、 $Y_{ij} = \exp(-jkr)$

$$[a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7)]$$

とされる。相互リアクション B_{ij} についての近似式は、 $B_{ij} = \exp(-jkr)$

$$[c_0 + c_1 f^2 + c_2 f^4 + c_3 f^6 + c_4 f^8 + j(d_0 f + d_1 f^3 + d_2 f^5 + d_3 f^7 + d_4 f^9)]$$

【0061】近似式は入力処理部1からの入力により指定又は変更するようにしても良い。一般的に近似の精度は近似式の項数 n に依存すると考えられる。従って、近似式の形即ち近似式の項数 n を変更することにより、近似の精度をあまり問題にしない時には項数 n を減らしてより高速で電界等を求め、処理時間をあまり問題にしない時には項数 n を増やしてより高い精度で電界等を求めることができる。

【0062】近似係数算出処理部5は、近似係数の算出のためにインピーダンスファイル7に格納された n 個の相互インピーダンス等を読み出すが、読み出した後はインピーダンスファイル7は不要となる。そこで、近似係数算出処理部5は、インピーダンスファイル7として使用されていたファイルに、算出した近似係数を格納する。即ち、インピーダンスファイル7を係数ファイル8として使用する。従って、インピーダンスファイル7と係数ファイル8としては、同一のファイルが用いられる。ファイルに格納すべき相互インピーダンス等及び近似係数のデータ量が多いので、1個のファイルをこのように使用することにより、メモリ資源を有効に活用することができる。

【0063】例えば、 $n=5$ であり、5個のサンプリング周波数 $f_{s1} \sim f_{s5}$ における5個の相互インピーダンス $Z_{ij_{s1}} \sim Z_{ij_{s5}}$ が求められている場合、近似係数算出処理部5は、5個の実数部 α'_{ij} の値と5個のサンプリング周波数とを近似式の実数部に代入することにより、実数部についての5個の連立方程式を立てる。これらの連立方程式は、添字である i 及び j の値で定まる2個の要素間の相互インピーダンス Z_{ij} (の実数部 α'_{ij}) についてのものである。これらの連立方程式は以下のように表される。

における計算を基に以下のように計算される。

$$\begin{aligned} Z_{ij_{s1}} / \exp[-j(2\pi f_{s1}/c)r] &= \alpha'_{ij_{s1}} + j\beta'_{ij_{s1}} \\ Z_{ij_{s2}} / \exp[-j(2\pi f_{s2}/c)r] &= \alpha'_{ij_{s2}} + j\beta'_{ij_{s2}} \\ Z_{ij_{s3}} / \exp[-j(2\pi f_{s3}/c)r] &= \alpha'_{ij_{s3}} + j\beta'_{ij_{s3}} \\ Z_{ij_{s4}} / \exp[-j(2\pi f_{s4}/c)r] &= \alpha'_{ij_{s4}} + j\beta'_{ij_{s4}} \\ Z_{ij_{s5}} / \exp[-j(2\pi f_{s5}/c)r] &= \alpha'_{ij_{s5}} + j\beta'_{ij_{s5}} \end{aligned}$$

また、サンプリング周波数 $f_{s1} \sim f_{s5}$ の値は指定されている。更に、 i 及び j の値で定まる2個の要素の中心間の距離 r は既知の値である。従って、5個の未知数 $a_0 \sim a_4$ についての5個の連立方程式を解くことによって、近似係数 $a_0 \sim a_4$ の値を求めることができる。従って、これらの近似係数 $a_0 \sim a_4$ は、 i 及び j の値で定まる2個の要素間の相互インピーダンス Z_{ij} (の実数部) を表す近似式において用いられる近似係数である。

*

$$\begin{aligned} \beta'_{ij_{s1}} &= b/f_{s1} + b1f_{s1} + b2f_{s1}^3 + b3f_{s1}^5 + b4f_{s1}^7 \\ \beta'_{ij_{s2}} &= b/f_{s2} + b1f_{s2} + b2f_{s2}^3 + b3f_{s2}^5 + b4f_{s2}^7 \\ \beta'_{ij_{s3}} &= b/f_{s3} + b1f_{s3} + b2f_{s3}^3 + b3f_{s3}^5 + b4f_{s3}^7 \\ \beta'_{ij_{s4}} &= b/f_{s4} + b1f_{s4} + b2f_{s4}^3 + b3f_{s4}^5 + b4f_{s4}^7 \\ \beta'_{ij_{s5}} &= b/f_{s5} + b1f_{s5} + b2f_{s5}^3 + b3f_{s5}^5 + b4f_{s5}^7 \end{aligned}$$

これらの連立方程式を解くことによって、近似係数 $b_0 \sim b_4$ の値を求めることができる。従って、これらの近似係数 $b_0 \sim b_4$ は、 i 及び j の値で定まる2個の要素間の相互インピーダンス Z_{ij} (の虚数部) を表す近似式において用いられる近似係数である。

【0065】本発明において、近似係数算出処理部5は、これらの連立方程式をLU分解法を用いて解くことによって、近似係数 $a_0 \sim a_4$ 及び近似係数 $b_0 \sim b_4$ を求める。従って、近似係数 $a_0 \sim a_4$ 及び近似係数 $b_0 \sim b_4$ は前記連立方程式をLU分解法以外の例えばガウス消去法等により直接解くことによって算出されない。即ち、前記連立方程式に例えば相互インピーダンス Z_{ij} の実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ の値やサンプリング周波数 $f_{s1} \sim f_{s5}$ の値等を代入し、当該連立方程式を例えばガウス消去法等により直接解き、近似係数 $a_0 \sim a_4$ を算出することは行われない。近似係数 $b_0 \sim b_4$ についても同様である。

【0066】前記連立方程式をガウス消去法等により直接解く場合、 i 及び j の値の変化に応じて実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ の値等も変化するものであるから、連立方程式を解いて近似係数 $a_0 \sim a_4$ を算出する処理を i 及び j の値の組合せの数だけ繰り返す必要がある。これに対して、本発明によりLU分解法により前記連立方程式を解く場合、 i 及び j の値の変化に応じて実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim$ ※

$$\begin{aligned} a_0 + a1f_{s1}^2 + a2f_{s1}^4 + a3f_{s1}^6 + a4f_{s1}^8 &= \alpha'_{ij_{s1}} \\ a_0 + a1f_{s2}^2 + a2f_{s2}^4 + a3f_{s2}^6 + a4f_{s2}^8 &= \alpha'_{ij_{s2}} \\ a_0 + a1f_{s3}^2 + a2f_{s3}^4 + a3f_{s3}^6 + a4f_{s3}^8 &= \alpha'_{ij_{s3}} \\ a_0 + a1f_{s4}^2 + a2f_{s4}^4 + a3f_{s4}^6 + a4f_{s4}^8 &= \alpha'_{ij_{s4}} \\ a_0 + a1f_{s5}^2 + a2f_{s5}^4 + a3f_{s5}^6 + a4f_{s5}^8 &= \alpha'_{ij_{s5}} \end{aligned}$$

この式①において、5個の相互インピーダンス $Z_{ij_{s1}} \sim Z_{ij_{s5}}$ の実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ の値は、サンプル計算処理部4における計算を基に求めることができる。実 ☆

$$\alpha'_{ij_{s1}} + j\beta'_{ij_{s1}} = Z_{ij_{s1}} / \exp[-j(2\pi f_{s1}/c)r]$$

※【0064】同様に、近似係数算出処理部5は、5個の虚数部 β'_{ij} の値と5個のサンプリング周波数とを近似式の虚数部に代入することにより、虚数部についての5個の連立方程式を立てる。これらの連立方程式は、 i 及び j の値で定まる2個の要素間の相互インピーダンス Z_{ij} (の虚数部 β'_{ij}) についてのものである。これらの連立方程式は以下のように表される。

※ $\alpha'_{ij_{s5}}$ の値等も変化するのにもかかわらず、連立方程式を解く処理の一部を、どのような i 及び j の値の組合せにも共通の処理とし、かつ、連立方程式を解く処理の残りの部分を比較的簡単な計算処理とすることができ。従って、当該連立方程式を解く処理の残りの部分のみを i 及び j の値の変化に応じて繰り返すことにより、近似係数を高速で算出できる。

(相互インピーダンス等の近似係数をLU分解法で算出することの説明) ここで、相互インピーダンス Z_{ij} 等の近似式の近似係数がLU分解法で算出できる理由について説明する。なお、以下の説明は、相互インピーダンス Z_{ij} の実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ の近似係数 $a_0 \sim a_4$ についての説明である。

【0067】再度、近似係数算出処理部5が解くべき連立方程式の一例を示す。前述のように、例えば $n=5$ であり、サンプリング周波数が $f_{s1} \sim f_{s5}$ である場合、近似係数算出処理部5は、相互インピーダンス Z_{ij} の実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ についての5個の連立方程式を用いる。これらの連立方程式は、添字である i 及び j の値で定まる2個の要素間の相互インピーダンス Z_{ij} の実数部 α'_{ij} についてのものである。

【0068】この連立方程式は以下のように表される。以下の連立方程式を式①とする。

☆数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ の値は以下のように計算される。以下の式を式②とする。

17

$$\begin{aligned}\alpha'_{ij_{s2}} + j \beta'_{ij_{s2}} &= Z_{ij_{s2}} / \exp[-j(2\pi f_{s2}/c)r] \\ \alpha'_{ij_{s3}} + j \beta'_{ij_{s3}} &= Z_{ij_{s3}} / \exp[-j(2\pi f_{s3}/c)r] \\ \alpha'_{ij_{s4}} + j \beta'_{ij_{s4}} &= Z_{ij_{s4}} / \exp[-j(2\pi f_{s4}/c)r] \\ \alpha'_{ij_{s5}} + j \beta'_{ij_{s5}} &= Z_{ij_{s5}} / \exp[-j(2\pi f_{s5}/c)r]\end{aligned}$$

従って、式①において、実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ は i 及び j の値の変化に応じて変化する。サンプリング周波数 $f_{s1} \sim f_{s5}$ は固定値である。5個の近似係数 $a0 \sim a4$ は未知数である。従って、式①の左辺は未知数 $a0 \sim a4$ に係数 $f_{s1}^0 \sim f_{s5}^8$ 等乗じた構成であり、式①の右辺は i 及び j の値の変化に応じて変化する変数 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ であると考えられる。

【0069】このような観点から式①をみると、未知数 $a0 \sim a4$ を除いた左辺は、添字である i 及び j の値によっては変化しない。即ち、 i 及び j の値が変化して相互インピーダンス Z_{ij} の実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ の値が異なる場合でも、左辺の係数 $f_{s1}^0 \sim f_{s5}^8$ 等からなる5

*行5列の係数行列は変化しない。式①において、 i 及び j の値の変化に応じて変化するのは、左辺の未知数の各々及び右辺の定数項である。

【0070】式①の左辺の係数行列が i 及び j の値によっては変化しない点に着目することによって、式①である連立方程式の解法としてLU分解法を適用することが可能となる。即ち、LU分解法に従って、式①の左辺の係数 $f_{s1}^0 \sim f_{s5}^8$ 等からなる5行5列の係数行列を、以下に示すように、対角項が1の下三角行列 L と上三角行列 U とに分解する。以下の式を式③とする。

【0071】

【数1】

$$\begin{bmatrix} 1 & f_{s1}^2 & f_{s1}^4 & f_{s1}^6 & f_{s1}^8 \\ 1 & f_{s2}^2 & f_{s2}^4 & f_{s2}^6 & f_{s2}^8 \\ 1 & f_{s3}^2 & f_{s3}^4 & f_{s3}^6 & f_{s3}^8 \\ 1 & f_{s4}^2 & f_{s4}^4 & f_{s4}^6 & f_{s4}^8 \\ 1 & f_{s5}^2 & f_{s5}^4 & f_{s5}^6 & f_{s5}^8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_{21} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ L_{31} & L_{32} & 1 & 0 & 0 \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & 1 & 0 \\ L_{51} & L_{52} & L_{53} & L_{54} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} & U_{14} & U_{15} \\ 0 & U_{22} & U_{23} & U_{24} & U_{25} \\ 0 & 0 & U_{33} & U_{34} & U_{35} \\ 0 & 0 & 0 & U_{44} & U_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & U_{55} \end{bmatrix}$$

【0072】ここで、式③の左辺の係数行列（係数 $f_{s1}^0 \sim f_{s5}^8$ 等からなる5行5列の係数行列）を、後述する式④における表現の便宜のために、以下のようにお

く。

40 【0073】

【数2】

19

20

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_{s1}^2 & f_{s1}^4 & f_{s1}^6 & f_{s1}^8 \\ 1 & f_{s2}^2 & f_{s2}^4 & f_{s2}^6 & f_{s2}^8 \\ 1 & f_{s3}^2 & f_{s3}^4 & f_{s3}^6 & f_{s3}^8 \\ 1 & f_{s4}^2 & f_{s4}^4 & f_{s4}^6 & f_{s4}^8 \\ 1 & f_{s5}^2 & f_{s5}^4 & f_{s5}^6 & f_{s5}^8 \end{bmatrix}$$

【0074】これにより、式③の右辺における下三角行列L及び上三角行列Uの要素の各々は、LU分解法に従って、以下のように表される。以下の式を式④とする。ここで、U_{1n}等は式③における上三角行列Uの要素であ *

$$\begin{aligned} U_{1n} &= C_{1n} & (n=1 \sim 5) \\ L_{m1} &= C_{m1} / U_{11} & (m=2 \sim 5) \\ U_{2n} &= C_{2n} - L_{21}U_{1n} & (n=2 \sim 5) \\ L_{m2} &= (C_{m2} - L_{m2}U_{12}) / U_{22} & (m=3, 4, 5) \\ U_{3n} &= C_{3n} - L_{31}U_{1n} - L_{32}U_{2n} & (n=3, 4, 5) \\ L_{m3} &= (C_{m3} - L_{m1}U_{13} - L_{m2}U_{23}) / U_{33} & (m=4, 5) \\ U_{4n} &= C_{4n} - L_{41}U_{1n} - L_{42}U_{2n} - L_{43}U_{3n} & (n=4, 5) \\ L_{54} &= (C_{54} - L_{51}U_{14} - L_{52}U_{24} - L_{53}U_{34}) / U_{44} \\ U_{55} &= C_{55} - L_{51}U_{15} - L_{52}U_{25} - L_{53}U_{35} - L_{54}U_{45} \end{aligned}$$

従って、未知数a₀~a₄は、要素L_{mn}、U_{mn}及び相互インピーダンスの実数部α'ij_{s1}~α'ij_{s5}を用いて次のように求められる。以下の式を式⑤とする。なお、この式⑤は、次式によって求めたY_nと式④により既知の要素U_{mn}とから未知数a₀~a₄を求める処理である。

$$a_4 = Y_5 / U_{55}$$

$$a_m = (Y_{m+1} - \sum U_{m+1,n} \times a_n) / U_{m+1,m+1}$$

但し、Σはn= m+1 から4までであり、m=3, 2, 1, 0である。また、U_{m+1,n}は第m+1行第n列の上三角行列Uの要素を表し、U_{m+1, m+1}は第m+1行第m+1列の上三角行列Uの要素を表す。

【0075】ここで、Y_nは次式のようにおいている。なお、この式は、i及びjの値の組合せに応じて定まる実数部α'ij_{s1}~α'ij_{s5}の値と式④により既知の要素L_{mn}とからY_nを求める処理である。

$$Y_1 = \alpha'ij_{s1}$$

$$Y_m = (\alpha'ij_{sm} - \sum L_{mn} \times Y_n)$$

但し、Σはn=1からmまでであり、m=2, 3, 4, 5である。また、L_{mn}は第m行第n列の下三角行列Lの要素である。

【0076】以上の説明から判るように、要素L_{mn}及びU_{mn}の値は、5個のサンプリング周波数f_{s1}~f_{s5}の値のみによって定まり、i及びjの値によっては変化しない。従って、要素L_{mn}及びU_{mn}の値は、i及びjの値が変化して相互インピーダンスZ_{ij}の実数部α'ij_{s1}~

*り、L_{m1}は式③における下三角行列Lの要素である。また、例えば添字1nは第1行第n列を表し、添字m1は第m行第1列を表す。

α'ij_{s5}の値が変化することにはかわらず、前記式④の計算によって1回だけ求めれば良い。そして、要素L_{mn}及びU_{mn}の値は5個のサンプリング周波数f_{s1}~f_{s5}のみから求まる。

【0077】また、以上の説明から判るように、未知数a₀~a₄は、i及びjの値が変化して相互インピーダンスZ_{ij}の実数部α'ij_{s1}~α'ij_{s5}の値が変化することに伴って変化し、前記式⑤の計算をi及びjの値が変化に応じて繰り返すことによって求まる。即ち、要素L_{mn}とi及びjの値の組合せに応じて定まる実数部α'ij_{s1}~α'ij_{s5}の値とからY₁及びY_mを求め、このY₁及びY_mと要素U_{mn}とから未知数a₀~a₄を求める。

【0078】なお、このように、式④の計算処理の結果である要素L_{mn}及びU_{mn}の値は、近似係数a₀~a₄を求めるために用いられる値である。要素L_{mn}及びU_{mn}の値は近似係数a₀~a₄を求めるための演算処理をその中間まで予め実行した結果得られるものである。従って、要素L_{mn}及びU_{mn}の値は近似係数a₀~a₄算出処理の中間結果であると考えられる。また、式④の計算処理は式⑤の計算処理を繰り返し実行するための前処理であると考えられる。

【0079】LU分解法によれば、式④の連立方程式は以下のように解かれる。まず、5個のサンプリング周波数f_{s1}~f_{s5}の値を用いた上記式④の計算によって、全ての要素L_{mn}及びU_{mn}の値が求められる。この演算処理は1回のみで済む。次に、i及びjの値の組合せによつ

て定まる 2 個の要素間の相互インピーダンス Z_{ij} の実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ に対して、順次、式⑤の計算によって未知数 $a_0 \sim a_4$ が求められる。この演算処理は i 及び j の値の組合せの数だけ繰り返行われる。

【0080】以上は、相互インピーダンスの近似式の虚数部 $\beta'_{ij_{s1}} \sim \beta'_{ij_{s5}}$ における近似係数 $b_0 \sim b_4$ についても同様である。また、相互アドミッタンス及び相互リアクションについても同様である。以上は近似式の相似性から明らかである。従って、近似係数算出処理部 5 において、相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションについて、当該相互インピーダンス等を表す近似式における複数の近似係数を、上記式④及び⑤による計算によって算出できる。即ち、LU 分解法により相互インピーダンス等の近似式における近似係数を算出できる。

【0081】LU 分解法による近似係数の算出処理（以下、本発明の処理とも言う）について図 3 に示す。なお、図 3 に示す一連の処理 S 5 1 ～ S 5 4 は、近似係数算出処理部 5 が実行する処理であって、後述する図 5 に示す処理 S 5 に相当する処理である。なお、この処理は、相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれの近似式の近似係数を算出する場合でも同様である。

【0082】図 3 に示すように、本発明の処理において、まず、近似式に対応する連立方程式であって LU 分解法に従う連立方程式（の一部）をセットして、その解の中間結果を式④の計算により求める（S 5 1）。具体的には、前記式①ではなく、式④を CPU 及びメモリにセットして、5 個のサンプリング周波数 $f_{s1} \sim f_{s5}$ の値を用いて、式④によって要素 L_{mn} 、 U_{mn} を求める。この処理は実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ 及び虚数部 $\beta'_{ij_{s1}} \sim \beta'_{ij_{s5}}$ の双方について実行される。この処理は 1 回のみ行われる処理であって、以下の繰り返し処理の前処理である。

【0083】次に、特定の i 及び j の値の組合せに対応する相互インピーダンス Z_{ij} の実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ 及び虚数部 $\beta'_{ij_{s1}} \sim \beta'_{ij_{s5}}$ の具体的な数値が、サンプル計算処理部 4 における当該相互インピーダンス Z_{ij} の計算を基に、前記式②に従って求められる（S 5 2）。

【0084】次に、LU 分解法に従う連立方程式の解を、式⑤の計算により求める（S 5 3）。具体的には、式⑤を CPU 及びメモリにセットして、S 5 1 において求めた要素 L_{mn} 、 U_{mn} の値と S 5 2 において求めた相互インピーダンスの実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ 及び虚数部 $\beta'_{ij_{s1}} \sim \beta'_{ij_{s5}}$ の値とを、セットされた式⑤に代入して計算する。これにより、特定の i 及び j の値の組合せに対応する近似係数 $a_0 \sim a_4$ 及び近似係数 $b_0 \sim b_4$ が式⑤に示す比較的簡単な計算により求められる。

【0085】求めた近似係数 $a_0 \sim a_4$ 及び近似係数 $b_0 \sim b_4$

は、特定の i 及び j の値で定まる 2 個の要素についてのものであるから、 i 及び j の値の全てについて近似係数 $a_0 \sim a_4$ 及び近似係数 $b_0 \sim b_4$ を求める処理が繰り返される。そこで、 i 及び j の値の組合せの全てについて近似係数 $a_0 \sim a_4$ 及び近似係数 $b_0 \sim b_4$ を求めたか否かを調べる（S 5 4）。求めている場合、 i 及び j の値の組合せの全てについて近似係数 $a_0 \sim a_4$ 及び近似係数 $b_0 \sim b_4$ を求める処理が繰り返される。

【0086】従って、本発明の処理による場合、上記の処理 S 5 1 は 1 回のみ実行され、処理 S 5 2 ～ S 5 4 のみが i 及び j の組合せの数だけ繰り返される。即ち、近似式に対応する連立方程式の一部である式④を CPU 及びメモリにセットして、これを解いて中間結果を得る処理（S 5 1）を i 及び j の組合せの数だけ繰り返す必要がない（ループの外に出すことができる）。 i 及び j の組合せの数だけ繰り返される処理は式⑤を解く処理、即ち、連立方程式を解く処理の一部のみである。従って、この分処理速度を向上することが可能となる。

【0087】ここで、本発明の処理との対比のために、前述の式①に示される連立方程式にサンプリング周波数 $f_{s1} \sim f_{s5}$ の値等を代入して、例えばガウス消去法等により未知数である近似係数 $a_0 \sim a_4$ 等を求める場合（以下、通常の処理と言う）について説明する。

【0088】通常の処理による近似係数算出処理フローを図 4 に示す。なお、図 4 は前述の $n=5$ の場合についての通常の処理による近似係数算出処理フローを示す。従って、相互インピーダンス Z_{ij} を表す近似式等は前述の通りである。

【0089】図 4 において、まず、相互インピーダンス Z_{ij} の実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ 及び虚数部 $\beta'_{ij_{s1}} \sim \beta'_{ij_{s5}}$ の値が、サンプル計算処理部 4 における計算を基に、前述の式②に従って求められる（S 5 1'）。S 5 1' は図 3 の S 5 2 と同一の処理である。

【0090】次に、相互インピーダンス Z_{ij} の実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ 及び虚数部 $\beta'_{ij_{s1}} \sim \beta'_{ij_{s5}}$ についての前記連立方程式①をセットして、これをガウス消去法等により直接解く（S 5 2'）。まず、相互インピーダンス Z_{ij} の実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ についての連立方程式①をそのままの形で CPU 及びメモリにセットする。セットした連立方程式①に、サンプリング周波数 $f_{s1} \sim f_{s5}$ の値、相互インピーダンスの実数部 $\alpha'_{ij_{s1}} \sim \alpha'_{ij_{s5}}$ の値、距離 r の値等を代入する。そして、5 個の未知数についての 5 個の式からなる連立方程式①をガウス消去法等により解く。これにより、近似係数 $a_0 \sim a_4$ が求められる。近似係数 $b_0 \sim b_4$ についても同様である。

【0091】この通常の処理においては、S 5 2' は連続した一連の不可分な処理として実行される。従って、連立方程式①の解（近似係数 $a_0 \sim a_4$ 等）の中間結果（要素 L_{mn} 、 U_{mn} ）を得て、これを保持して解を求める処理

に繰り返し利用することはできない。

【0092】求めた近似係数 $a_0 \sim a_4$ 及び近似係数 $b_0 \sim b_4$ は、特定の i 及び j の値で定まる2個の要素についてのものであるから、 i 及び j の値の全てについて近似係数 $a_0 \sim a_4$ 及び近似係数 $b_0 \sim b_4$ を求める処理が繰り返される。そこで、 i 及び j の値の組合せの全てについて近似係数 $a_0 \sim a_4$ 及び近似係数 $b_0 \sim b_4$ を求めたか否かを調べる(S53')。求めている場合、 i 及び j の値の組合せの全てについて近似係数 $a_0 \sim a_4$ 及び近似係数 $b_0 \sim b_4$ を求める処理(S51' ~ S52')及びS53'が繰り返される。S53'は図3のS54と同一の処理である。

【0093】従って、通常の処理による場合、上記の処理S51' ~ S53'の各々が i 及び j の組合せの数だけ繰り返される。特に、近似式に対応する連立方程式①をセットしてこれを直接解く処理(S52')を i 及び j の組合せの数だけ繰り返さなければならない。これが処理速度の向上の妨げとなる。

【0094】本発明の処理と通常の処理とを比較すると、本発明の処理は、近似式に対応する連立方程式を中間結果を得る段階まで解く処理(S51)を繰り返しループの外に出すことができる。即ち、図3及び図4の比較から判るように、図3のS51及びS53は、その処理の内容は異なるものの、図4のS52'に相当する。本発明による処理は、1個の処理であった図4のS52'を図3のS51及びS53に2分割して、かつ、その一方の処理S51を繰り返しループの外に出した処理である。

【0095】LU分解法以外の処理、例えばガウス消去法等によって連立方程式を解く場合、連立方程式の変形を繰り返して解を求めるため、その解の中間結果を得て保存しておくことはできず、また、連立方程式①をセット時の形のまま保持することもできない。従って、この場合、連立方程式①を解く処理は図4のS52'のように一括して行わなければならない。その都度連立方程式①をセットして最初から解かなければならない。従って、解の中間結果を得る処理を分割するようなことはできず、当該処理を繰り返しループの外に出すことはできない。

【0096】これに対して、本発明の処理のように、LU分解法によって連立方程式を解く場合、連立方程式①を解く処理を式④の計算処理(S51)と式⑤の計算処理(S53)とに2分割できる。更に、式④の計算処理(S51)の結果を中間結果として保存して、これを繰り返し式⑤の計算処理(S53)に利用できる。従って、一方の処理S51を繰り返しループの外に出すことができる。このことは連立方程式をLU分解法によって解くことによって始めて可能となる。

【0097】ここで、式④と式⑤とを比較すると、式④の計算処理の方が式⑤の計算処理の約2倍の処理量があ

ることが判る。従って、連立方程式①を解くための処理の相当部分を繰り返しループの外に出すことができ、かつ、繰り返し実行する処理を少なくできるので、処理を高速化できる。

【0098】以上のように、本発明の処理は、連立方程式①を解く処理の大部分を占める処理S51を繰り返しループの外に出すことによって、この分処理を高速化している。LU分解法により連立方程式を解く場合の算出速度は、近似係数の算出速度をガウス消去法によって連立方程式を解く場合のそれよりも、5倍~10倍早くなる。なお、このような幅があるのは近似係数の算出速度が連立方程式を解く際の種々の条件に依存するためである。従って、この値は概略的な値である。

【0099】以上が近似係数計算部2における処理である。近似係数計算部2が行う処理は、相互インピーダンス等の近似式における近似係数をLU分解法により算出して近似式を完成する処理である。この処理は各周波数における相互インピーダンス等を近似計算により求める処理の前処理である。この処理は n 個からなる1組のサンプリング周波数について1回だけ実行される。

【0100】近似係数計算部2においては、相互インピーダンス等の算出処理が近似式を用いない周知の方法によって行われる。しかし、この算出処理は着目した2個の要素間あたり高々数個の相互インピーダンス等について行われるのみである。従って、この算出処理が全体の処理時間に与える影響はあまり大きくない。

【0101】これに対して、実際の相互インピーダンス等の算出処理は近似計算処理部9において行われる。この算出処理は簡潔な形の近似式を用いた近似計算により行われる。従って、1個の周波数における相互インピーダンスの算出に要する時間は極めて短時間である。この算出処理は、周波数範囲内にある複数個(例えば後述の98個)の所定の周波数について、繰り返し実行される。しかし、1個の周波数についての処理時間が極めて短いので、結果として全体の処理時間を極めて短くできる。

【0102】近似計算処理部9は、近似係数算出処理部5が算出した複数の近似係数を用いて、前記近似式に従って、周波数範囲内の所定の周波数についての相互インピーダンス等の近似値を算出する。このために、近似計算処理部9は係数ファイル8を参照する。前述の近似式において、周波数 f 以外の値は既に定まっている。従って、所望の周波数を近似式に代入することにより、当該周波数における相互インピーダンス等が算出できる。近似計算処理部9は、算出した相互インピーダンス等をメモリの所定の位置に格納する。

【0103】例えば、 $n=5$ である場合、相互インピーダンス Z_{ij} についての近似式は、 $Z_{ij} = \exp[-j(2\pi f/c)r][a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7)]$ とされる。この近

似式において、2個の要素の中心間の距離 r 、近似係数 $a0 \sim a4$ 及び $b0 \sim b4$ は既知の値である。そこで、周波数 f を近似式に代入することにより、当該周波数における相互インピーダンス Z_{ij} を算出することができる。

【0104】この近似式を用いて、周波数範囲内の所定の周波数における相互インピーダンスの計算が繰り返行われる。例えば、電気回路装置の基本クロックの周波数が10MHzであり周波数範囲が30MHz～1GHzである場合、基本周波数32MHzの高調波の各々における相互インピーダンスが求められる。高調波は基本周波数の整数倍であるから、周波数範囲30MHz～1GHz内に存在する高調波は、30MHz、40MHz、50MHz、・・・990MHz、1GHzである。即ち、周波数範囲内に98個存在する。この98個の高調波における相互インピーダンス Z_{ij} が、従来とは異なり、近似式により算出される。

【0105】なお、電磁界強度算出装置20によって、電気回路装置における相互インピーダンスのみを算出することもできる。即ち、電磁界強度算出装置20を相互インピーダンス算出装置として用いることもできる。この場合、電磁流計算処理部10及び電界磁界計算処理部11における処理を省略して、近似計算処理部9において算出した相互インピーダンスを出力するようにすれば良い。同様にして、相互アドミッタンスのみ又は相互リアクションのみを算出することもできる。

【0106】電磁流計算処理部10は、近似計算処理部9が算出した相互インピーダンス等の近似値を用いてモーメント法の連立方程式を構成し、各要素を流れる電流の値を算出する。このために、電磁流計算処理部10は、近似計算処理部9がメモリに格納した相互インピーダンス等の近似値を参照する。電磁流計算処理部10は、算出した電流値をメモリの所定の位置に格納する。

【0107】例えば、相互インピーダンス Z_{ij} についてのモーメント法の連立方程式は $[Z_{ij}][I_i] = [V_i]$ である。「 $[]$ 」はマトリクスを表す。この連立方程式に求めた相互インピーダンス Z_{ij} が代入される。波源 $[V_i]$ は既知であるから、各要素を流れる電流の値 $[I_i]$ が求まる。電流値 $[I_i]$ の算出は周波数範囲内の所定の周波数について繰り返行われる。相互アドミッタンス及び相互リアクションについても同様である。

【0108】なお、相互インピーダンス Z_{ij} についてのモーメント法の連立方程式は $[Z_{ij}][I_i] = [V_i]$ に限られない。相互アドミッタンス及び相互リアクションについても同様である。これについては後述する。

【0109】電界磁界計算処理部11は、電磁流計算処理部10が算出した複数の電流値を用いた所定の計算によって、電界 E 及び磁界 H を算出する。このために、電界磁界計算処理部11は、電磁流計算処理部10がメモ

りに格納した電流値を参照する。電界磁界計算処理部11は算出した電界 E 及び磁界 H を出力ファイル12に格納する。これにより、電気回路装置の放射する電磁界強度が計算される。

【0110】なお、この後、図外の出力処理部が、出力ファイル12に蓄積された電界 E 及び磁界 H のデータに基づいて、図21に示す放射電磁界強度の周波数分布をグラフ表示する周波数スペクトラムを生成して出力する。出力処理部が、出力ファイル12に蓄積された電界 E 及び磁界 H のデータに基づいて、他の形式により電磁界強度の周波数分布を出力するようにしても良い。

(電磁界強度算出処理フロー) 図5は電磁界強度算出装置20が実行する電磁界強度算出処理フローを示す。この処理フローは、相互インピーダンスを算出し、これを用いて電磁界強度を算出する例を示す。なお、相互アドミッタンス及び相互リアクションを算出する場合でも同様である。

【0111】電磁界強度算出装置20が起動された場合、入力処理部1が構造情報を読み込み配列を決定する。この後、周波数範囲が外部から指定入力された場合、入力処理部1がこの周波数範囲を取り込む(S1)。

【0112】サンプル指定処理部3が、周波数範囲と近似計算処理部9が使用する近似式の実数部及び虚数部の項数 n とに基づいて、複数のサンプリング周波数を指定する(S2)。

【0113】サンプル計算処理部4が指定された全てのサンプリング周波数における相互インピーダンス Z_{ij} の計算が終了したか否かを調べる(S3)。終了していない場合、サンプル計算処理部4が、モーメント法において用いられる周知の計算によって、未処理の1個のサンプリング周波数における相互インピーダンス Z_{ij} を計算する(S4)。この後、ステップS3を繰り返す。

【0114】終了している場合、近似係数算出処理部5が、前述の図3に示した処理S51～S54に従って、近似計算処理部9の使用する近似式の実数部及び虚数部についての連立方程式を立て、これをLU分解法によって解き、近似係数を算出する(S5)。以上で前処理が終了し、各周波数における相互インピーダンス Z_{ij} の近似計算、これを用いた電流値の計算及びこれに基づく電界磁界の計算の繰り返し処理が開始される。

【0115】近似計算処理部9が周波数範囲内の全ての周波数における相互インピーダンス Z_{ij} の計算が終了したか否かを調べる(S6)。終了した場合、電磁界強度算出処理を終了する。なお、この後、電界スペクトラムを出力する。

【0116】終了していない場合、近似計算処理部9が1個の周波数における相互インピーダンス Z_{ij} (の近似値)を近似式に従って計算する(S7)。電磁流計算処理部10が、モーメント法の連立方程式に相互インピー

ダンス Z_{ij} の近似値を代入し、これを解くことによって電流値を算出する(S8)。

【0117】電界磁界計算処理部11が全ての観測点についての電流の算出が終了したか否かを調べる(S9)。終了していない場合、ステップS6以下を繰り返す。

【0118】終了している場合、電界磁界計算処理部11が、電界E及び磁界Hを計算し、これを出力ファイル12に格納する(S10)。この後、再びステップS9を実行する。

(相互インピーダンスが周波数の多項式で近似できることの証明) 相互インピーダンスが近似式により近似できることを証明する。相互インピーダンスの近似式について説明するために、図6に示すモノポールを考える。図6において、太線はモノポールを示し、点線は展開関数*

$$Z = j\omega \int \left[\frac{\mu}{s} \frac{J_1 J_2 \cos \phi}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} + \frac{1}{4\pi\epsilon} \rho_1 \rho_2 \frac{e^{-jkr}}{r} \right] ds$$

【0121】 J_1 及び J_2 はモーメント法における展開関数である。展開関数はモノポール上の電流分布の形状を表す。展開関数はモーメント法の種類によって異なるが、以下の証明はいずれのモーメント法にも適用できる。即ち、展開関数は正弦波状電流(区分正弦波モーメント法の場合)、三角形状電流、パルス関数電流のいずれでも良い。従って、本発明の近似式による相互インピーダンスを算出する処理は、モーメント法の種類を問わず適用できる。また、以下の証明はモノポールの形状は面(サーフェイパッチ)又はワイヤーのいずれにも適用できる。従って、本発明の近似式による相互インピーダンスを算出する処理は、モノポールの形状を問わず適用できる。

【0122】以下、相互インピーダンスが周波数 f の n 乗($n=-1, 0, 1, 2, \dots$)の多項式で表すことができることを証明する。但し、以下の証明において、必要に応じて、より一般的な形である波数 k を用いる場合がある。ここに、 $k=2\pi f/c$ である。 c は光速である。

【0123】また、以下の証明は、区分正弦波モーメント法についての証明であるが、他のモーメント法、即

*の形状を示す。ここで、モノポール①とモノポール③との傾きを ϕ_1 とし、モノポール①とモノポール④との傾きを ϕ_2 とする。図6では ϕ_1 と ϕ_2 が同じ場合、つまり $\phi_1=\phi_2=\phi$ の場合を記載している。

【0119】相互インピーダンスの一般式は次式で表される。ここで、 ω は各周波数、 r は距離、 $\rho_1=-(1/j\omega) \times (\partial J_1 / \partial t)$ であり、 $\rho_2=-(1/j\omega) \times (\partial J_2 / \partial t)$ である。また、次式において s を用いているのは、モノポールの形状が線状(即ち、ワイヤー)である場合に限らず、モノポールの形状が面状(即ち、サーフェイパッチ)である場合にも、次式を一般式として適用できることを示すためである。

【0120】

【数3】

ち、展開関数として三角形状電流、パルス関数電流を用いたモーメント法にも適用できる。なお、図6においては、図示の都合により展開関数を点線により三角形状に表してあるが、以下の説明における展開関数は正弦波状電流である。

【0124】区分正弦波モーメント法において、図6のモノポール①～④の展開関数は以下のように表すことができる。ここで、 d_1 はモノポール①の長さ、 d_2 はモノポール②の長さ、 d_3 はモノポール③の長さ、 d_4 はモノポール④の長さである。

電流モノポール① $J_1 = \text{sinc}(z-z_0)/\text{sinc}d_1$

電流モノポール② $J_1 = \text{sinc}(z_2-z)/\text{sinc}d_2$

電流モノポール③ $J_2 = \text{sinc}(t-t_0)/\text{sinc}d_3$

電流モノポール④ $J_2 = \text{sinc}(t_2-t)/\text{sinc}d_4$

これらの展開関数を用いて、まず、モノポール①とモノポール③の相互インピーダンス Z_{13} 及びモノポール①とモノポール④の相互インピーダンス Z_{14} を求める。相互インピーダンス Z_{13} 及び Z_{14} は以下のように求まる。

【0125】

【数4】

$$Z_{13} = \frac{j\omega\mu}{4\pi \text{sinkd}_1 \text{sinkd}_2} \frac{t_1 z_1}{\int \int [\text{sink}(z-z_0) \text{sink}(t-t_0) \cos \phi_1 - \cos k(z-z_0) \cos k(t-t_0)] \frac{e^{-jkr}}{r} dz dt}$$

$$Z_{14} = \frac{j\omega\mu}{4\pi \text{sinkd}_1 \text{sinkd}_4} \frac{t_2 z_1}{\int \int [\text{sink}(z-z_0) \text{sink}(-t+t_2) \cos \phi_2 + \cos k(z-z_0) \cos k(-t+t_2)] \frac{e^{-jkr}}{r} dz dt}$$

【0126】ここで、モノポール間の距離 $r = (z^2 + t^2 - 2zt \cos \phi + h^2)^{1/2}$ であるとする、上式の相互インピーダンス Z_{13} 及び Z_{14} の係数部は以下のように表 * される。なお、 $\alpha = c\mu/4\pi$ である。 【0127】 【数5】

$$\frac{j\omega\mu}{4\pi \text{sinkd}_1 \text{sinkd}_2} = j \frac{c\mu}{4\pi} \frac{k}{\text{sinkd}_1 \text{sinkd}_2} = j\alpha \frac{k}{A_1}$$

$$\frac{j\omega\mu}{4\pi \text{sinkd}_1 \text{sinkd}_4} = j \frac{c\mu}{4\pi} \frac{k}{\text{sinkd}_1 \text{sinkd}_4} = j\alpha \frac{k}{A_2}$$

【0128】また、モノポール間の距離 r は、一方のモノポールの端点と他方のモノポールの端点間の距離を r_0 ※と表せば、以下のように近似できる。 ※30

$$r = [r_0^2 + (x^2 - r_0^2)]^{1/2} = (r_0^2 + \Delta)^{1/2} = r_0(1 + \Delta/r_0^2)^{1/2} \\ \approx r_0(1 + \Delta/2r_0^2 - \Delta^2/8r_0^4 + \dots) \\ = r_0 + \Delta/2r_0 - \Delta^2/8r_0^3 + \dots = r_0 + d$$

ここで、 $r_0 = (z_1^2 + t_1^2 - 2z_1 t_1 \cos \phi + h^2)^{1/2}$ である。従って、相互インピーダンス Z_{13} 及び Z_{14} は以下のように表される。ここで、 $A_1 = \text{sinkd}_1 \text{sinkd}_2$ である。 【0129】 【数6】

$$Z_{13} = j\alpha \frac{k}{A_1} e^{-jkr_0} \int_{t_0}^{t_1} \int_{z_0}^{z_1} [\text{sinc}(z-z_0) \text{sinc}(t-t_0) \cos \phi_1$$

$$-\cos k(z-z_0) \cos k(t-t_0)] \frac{e^{-jkd}}{r} dz dt$$

$$Z_{14} = j\alpha \frac{k}{A_1} e^{-jkr_0} \int_{t_1}^{t_2} \int_{z_0}^{z_1} [\text{sinc}(z-z_0) \text{sinc}(-t+t_2) \cos \phi_2$$

$$+\cos k(z-z_0) \cos k(-t+t_2)] \frac{e^{-jkd}}{r} dz dt$$

【0130】ここで、式を簡潔な形にするために、 $z-z_0=u$ 、 $t-t_0=v$ 、 $w=-t+t_2$ とおく。また、モノポールが短いものとして、以下のように多項式近似を行*20

*う。ここで、 λ は波長であり、 $\lambda=2\pi/k$ である。

【0131】

【数7】

$$\sin ku \approx ku - (ku)^3/6, \quad \cos ku \approx 1 - (ku)^2/2$$

計算例:

$$\begin{aligned} u=0.1 \lambda \rightarrow \sin(0.2\pi) &= 0.587785 \\ &\approx ku = 0.6283 \quad (+6.89\%) \\ &\approx ku - (ku)^3/6 = 0.586958 \quad (-0.14\%) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u=0.12 \lambda \rightarrow \cos(0.2\pi) &= 0.809016 \\ &\approx 1 - (ku)^2/2 = 0.802608 \quad (-0.79\%) \\ \sin(0.24\pi) &= 0.684547 \\ &\approx ku = 0.75398 \quad (+10.14\%) \\ &\approx ku - (ku)^3/6 = 0.682542 \quad (-0.29\%) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos(0.24\pi) &= 0.728969 \\ &\approx 1 - (ku)^2/2 = 0.715755 \quad (-1.81\%) \end{aligned}$$

【0132】以上により、相互インピーダンス Z_{13} の実数部 R_1 は以下のように表される。なお、(数8)に示す式と(数9)に示す式とは併せて連続して展開される式を示す。また、以下の式において、 e^{-jkr_0} を省略し

である。

【0133】

【数8】

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \alpha \frac{k}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \iint [\sin ku \sin kv \cos \phi_1 \\
 &\quad - \cos ku \cos kv] \frac{\sin kd}{r} dz dt \\
 &= \alpha \frac{k}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \iint \left[\left[ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[kv - \frac{(kv)^3}{6} \right] \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - \left[1 - \frac{(ku)^2}{2} \right] \left[1 - \frac{(kv)^2}{2} \right] \right] \left[kd - \frac{(kd)^3}{6} \right] \frac{1}{r} dz dt \\
 &= \alpha \frac{k}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \iint \left[\left[uvk^2 - \frac{uv^3 + u^3 v}{6} k^4 + \frac{u^3 v^3}{36} k^6 \right] \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - \left[1 - \frac{u^2 + v^2}{2} k^2 + \frac{u^2 v^2}{4} k^4 \right] \right] \left[kd - \frac{(kd)^3}{6} \right] \frac{1}{r} dz dt \\
 &\quad * * \text{【数9】} \\
 &= \alpha \frac{1}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \iint \left[\left[uvdk^4 - \left(\frac{uv^3 + u^3 v}{6} d + \frac{uvd^3}{6} \right) k^6 \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \left(\frac{u^3 v^3}{36} d + \frac{(uv^3 + u^3 v)d^3}{36} \right) k^8 - \frac{u^3 v^3 d^3}{216} k^{10} \right] \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - dk^2 + \left(\frac{u^2 + v^2}{2} d + \frac{d^3}{6} \right) k^4 - \left(\frac{u^2 v^2}{4} d + \frac{u^2 + v^2}{12} d^3 \right) k^6 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{u^2 v^2}{24} d^3 k^8 \right] \frac{1}{r} dz dt
 \end{aligned}$$

【0135】ここで、式を簡潔な形にするために、 k^4 等の項の係数をP1～P8に書き換えると、上式は以下のよう表される。

$$R_1 = \left[\alpha / A_1 \right] \left[(P_1 k^4 - P_2 k^6 + P_3 k^8 - P_4 k^{10}) \cos \phi_1 - P_5 k^2 + P_6 k^4 - P_7 k^6 + P_8 k^8 \right] \quad *$$

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \left[\alpha e^{-jkr_0} / (d_1 d_3 k^2) \right] \left[(P_1 k^4 - P_2 k^6 + P_3 k^8 - P_4 k^{10}) \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - P_5 k^2 + P_6 k^4 - P_7 k^6 + P_8 k^8 \right] \\
 &= \left[\alpha e^{-jkr_0} / (d_1 d_3) \right] \left[(P_1 k^2 - P_2 k^4 + P_3 k^6 - P_4 k^8) \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - P_5 + P_6 k^2 - P_7 k^4 + P_8 k^6 \right]
 \end{aligned}$$

※更に、 A_1 はサイン関数なので、これを近似すると、 $A_1 = \sin kd_1 \sin kd_3 \approx d_1 d_3 k^2$ となる。この A_1 の近似値を代入し、先に表記を省略した e^{-jkr_0} を戻すと、上式は以下のように表される。

35

36

以上により、相互インピーダンス Z_{13} の実数部 R_1 が求まる。

【0136】次に、相互インピーダンス Z_{13} の虚数部 I_1 は以下のように表される。なお、(数10)に示す式と(数11)に示す式とは併せて連続して展開される式を*

*示す。また、以下の式において、 e^{-jkw_0} を省略してある。

【0137】

【数10】

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \alpha \frac{k}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \iint [\sin ku \sin kw \cos \phi_1 \\
 &\quad + \cos ku \cos kw] \frac{\cos kd}{r} dz dt \\
 &= \alpha \frac{k}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \iint \left[\left[ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[kw - \frac{(kw)^3}{6} \right] \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - \left[1 - \frac{(ku)^2}{2} \right] \left[1 - \frac{(kw)^2}{2} \right] \right] \left[1 - \frac{(kd)^2}{2} \right] \frac{1}{r} dz dt \\
 &= \alpha \frac{k}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \iint \left[\left[uwk^2 - \frac{uw^3 + u^3 w}{6} k^4 + \frac{u^3 w^3}{36} k^6 \right] \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - \left[1 + \frac{u^2 + w^2}{2} k^2 - \frac{u^2 w^2}{4} k^4 \right] \left[1 - \frac{(kd)^2}{2} \right] \right] \frac{1}{r} dz dt
 \end{aligned}$$

【0138】

※30※【数11】

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\alpha}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \iint \left[\left[uwk^2 - \left(\frac{uw^3 + u^3 w}{6} + \frac{u w d^2}{2} \right) k^5 \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \left(\frac{u^3 w^3}{36} + \frac{uw^3 + u^3 w}{12} d^2 \right) k^7 - \frac{u^3 w^3}{72} d^2 k^9 \right] \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - k \left(\frac{u^2 + w^2}{2} + \frac{d^2}{2} \right) k^3 - \left(\frac{u^2 w^2}{4} + \frac{u^2 + w^2}{4} d^2 \right) k^5 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{u^2 w^2}{8} d^2 k^7 \right] \frac{1}{r} dz dt
 \end{aligned}$$

【0139】ここで、式を簡潔な形にするために、 k^3 等の項の係数を $Q_1 \sim Q_8$ に書き換えると、上式は以下のうに表される。

$$I_1 = \left[\alpha / A_1 \right] \left[(Q_1 k^3 - Q_2 k^5 + Q_3 k^7 - Q_4 k^9) \cos \phi_1 - Q_5 k + Q_6 k^3 - Q_7 k^5 + Q_8 k^7 \right]$$

50 更に、 A_1 の近似値 $A_1 = \sin kd_1 \sin kd_3 \approx d_1 d_3 k^2$ を代入

し、また、先に表記を省略した e^{-jkr_0} を戻すと、上述 * * の場合と同様に、上式は以下のように表される。

$$I1 = [\alpha e^{-jkr_0} / (d1d3k^2)] [(Q1k^3 - Q2k^5 + Q3k^7 - Q4k^9) \cos \phi 1 \\ - Q5k + Q6k^3 - Q7k^5 + Q8k^7] \\ = [\alpha e^{-jkr_0} / (d1d3)] [(Q1k - Q2k^3 + Q3k^5 - Q4k^7) \cos \phi 1 \\ - Q5/k + Q6k - Q7k^3 + Q8k^5]$$

以上により、相互インピーダンス $Z13$ の第1項 $I1$ が求まる。

※【0140】ゆえに、相互インピーダンス $Z13$ は以下のよう表される。

$$Z13 = R1 + jI1 \\ = [\alpha e^{-jkr_0} / (d1d3)] [(P1k^2 - P2k^4 + P3k^6 - P4k^8) \cos \phi 1 \\ - P5 + P6k^2 - P7k^4 + P8k^6] \\ + j[\alpha e^{-jkr_0} / (d1d3)] [(Q1k - Q2k^3 + Q3k^5 - Q4k^7) \cos \phi 1 \\ - Q5/k + Q6k - Q7k^3 + Q8k^5]$$

相互インピーダンス $Z14$ についても同様に求めて求むることができる。相互インピーダンス $Z14$ を表す式は、相互インピーダンス $Z13$ を表す式において、 $\cos \phi$ の乗ぜられていない項を逆極性としたものとなる。即ち、相互インピーダンス $Z14$ は以下のように表される。なお、 P 及び Q に相当する係数として R 及び S が用いられる。

$$Z14 = [\alpha e^{-jkr_0} / (d1d4)] [(R1k^2 - R2k^4 + R3k^6 - R4k^8) \cos \phi 2 + R5 - R6k^2 + R7k^4 - R8k^6] + j \\ 20 [\alpha e^{-jkr_0} / (d1d4)] [(S1k - S2k^3 + S3k^5 - S4k^7) \cos \phi 2 + S5/k - S6k + S7k^3 - S8k^5]$$

ゆえに、相互インピーダンス($Z13 + Z14$)は、一般的に、以下のように表される。

$$Z13 + Z14 = e^{-jkr_0} [(C0 + C1k^2 + C2k^4 + C3k^6 + C4k^8 + \dots + j(C5k^{-1} + C6k + C7k^3 + C8k^5 + C9k^7 + \dots)]$$

相互インピーダンス($Z23 + Z24$)についても同様に求めて求むることができる。 $Z23$ はモノポール②とモノポール③の相互インピーダンスであり、 $Z24$ はモノポール②とモノポール④の相互インピーダンスである。

【0141】従って、相互インピーダンス($Z13 + Z14 + Z23 + Z24$)も、上式と同様に、波数 k (即ち、周波数 f)の多項式により表すことができる。

(相互アドミッタンスについて) 相互アドミッタンスについては、上記相互インピーダンスと同様に周波数の多項式で近似できることが証明でき、かつ、その近似★

単位ベクトル:

$$\begin{aligned} \text{モノポール①} & (s_x, s_y, s_z) = (0, 0, 1) \\ \text{モノポール③} & (t_x, t_y, t_z) = (\sin \phi_1, 0, \cos \phi_1) \\ \text{モノポール④} & (t_x, t_y, t_z) = (\sin \phi_2, 0, \cos \phi_2) \\ \rho \text{ 方向} & (v_x, v_y, v_z) = (x/\rho, h/\rho, 0) \\ \phi \text{ 方向} & (w_x, w_y, w_z) = (-h/\rho, x/\rho, 0) \end{aligned}$$

【0144】電流源が z 座標にのみ存在する場合、電磁界は円対称(ϕ 座標に無関係)となり、 H_ϕ のみが存在し、以下のように表すことができる。

★式も前述のように相互インピーダンスの近似式と全く同一であるので、その証明は省略する。

(相互リアクションが周波数の多項式で近似できることの証明) 相互リアクションが近似式により近似できることを証明する。相互リアクションの近似式について説明するために、図7に示すモノポールを考える。図7において、太線はモノポールを示し、点線は展開関数の形状を示す。ここで、モノポール①とモノポール③との傾きを ϕ_1 とし、モノポール①とモノポール④との傾きを ϕ_2 とする。図7では ϕ_1 と ϕ_2 とが同じ場合、つまり $\phi_1 = \phi_2 = \phi$ の場合を記載している。

【0142】まず、電流源による磁界について考える。区分正弦波モーメント法において、図7のモノポール①～④の展開関数は以下のように表すことができる。ここで、 $d1$ はモノポール①の長さ、 $d2$ はモノポール②の長さ、 $d3$ はモノポール③の長さ、 $d4$ はモノポール④の長さである。

$$30 \text{ 電流モノポール① } J1 = \text{sink}(z-z0)/\text{sink}d1$$

$$\text{電流モノポール② } J2 = \text{sink}(z2-z)/\text{sink}d2$$

$$\text{磁流モノポール③ } M3 = \text{sink}(t-t0)/\text{sink}d3$$

$$\text{磁流モノポール④ } M4 = \text{sink}(t2-t)/\text{sink}d4$$

また、単位ベクトルは以下のように表すことができる。

【0143】

【数12】

【0145】

【数13】

$$H\phi = \frac{1}{\mu} \nabla \times A = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_{\rho}}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \right)$$

$$A_{\rho}=0 \text{なので} \quad H\phi = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial \rho}$$

【0146】次に、リアクションについて考える。図7において、ワイヤ#2の接線方向の磁界成分は、 $H_t = -h/\rho \times H\phi \sin\phi$ であるから、リアクションBは以下のように表すことができる。

【0147】

【数14】

$$B = -h \int_t^M M \frac{H\phi}{\rho} \sin\phi \, hdt$$

$$= \frac{h}{\mu} \int_t^M M \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \sin\phi \, dt$$

*20

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_z J \frac{e^{-1kr}}{r} dz$$

$$\rho = (x^2 + h^2)^{1/2}$$

$$r = [\rho^2 + (z-z')^2]^{1/2} = (z^2 + t^2 - 2zt \cos\phi + h^2)^{1/2}$$

z' : モノポール③、④のz座標

$$\frac{dr}{d\rho} = \frac{\rho}{r}$$

$$\frac{\partial A_z}{\partial \rho} = \frac{\mu}{4\pi} \int_z J \frac{\partial}{\partial \rho} \frac{e^{-1kr}}{r} dz$$

$$= \int_z J \left(-jk \frac{\rho}{r^2} e^{-1kr} - \frac{\rho}{r^3} e^{-1kr} \right) dz$$

【0150】従って、リアクションBは、以下のように表すことができる。

【0151】

【数16】

41

42

$$B = \frac{h}{4\pi} \int_t \int_z J M \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \frac{e^{-jk\rho}}{r} \sin\phi \, dz \, dt$$

$$= \frac{h \sin\phi}{4\pi} \int_t \int_z J M \left[-\frac{jk}{r^2} - \frac{1}{r^3} \right] e^{-jk\rho} \, dz \, dt$$

【0152】更に、一方のモノポールの端点と他方のモノポールの端点との間の距離を、同様に、 $r_0 = (z_1^2 + t_1^2 - 2z_1 t_1 \cos\phi + h^2)^{1/2} \approx r_0 + d$ と表すことができるので、リアクションBは、以下のように表*

$$B \approx \frac{h \sin\phi}{4\pi} e^{-jk r_0} \int_t \int_z M J \left[-\frac{jk}{r^2} - \frac{1}{r^3} \right] e^{-jk d} \, dz \, dt$$

【0154】従って、モノポール①とモノポール③との間のリアクションB13、及び、モノポール①とモノポール④との間のリアクションB14は、以下のように表すこ※

$$B_{13} = \frac{h_1 \sin\phi_1}{4\pi \text{sink}d_1 \text{sink}d_3} e^{-jk r_0} \int_t \int_z \text{sink}(z-z_0) \text{sink}(t-t_0) \left[-\frac{jk}{r^2} - \frac{1}{r^3} \right] e^{-jk d} \, dz \, dt$$

$$B_{14} = \frac{h_2 \sin\phi_2}{4\pi \text{sink}d_1 \text{sink}d_4} e^{-jk r_0} \int_t \int_z \text{sink}(z-z_0) \text{sink}(t_2-t) \left[-\frac{jk}{r^2} - \frac{1}{r^3} \right] e^{-jk d} \, dz \, dt$$

【0156】ここで、式を簡潔な形にするために、 $z - z_0 = u$ 、 $t - t_0 = v$ 、 $w = -t + t_2$ とおく。また、モノポールが短いものとして、以下のような多項式近似を行う。即ち、 $\text{sink}u \approx ku - (ku)^3/6$ 及び $\cos ku \approx 1 - (ku)^2/2$ である。

【0157】以上により、相互リアクションB13の右辺

*すことができる。

【0153】

【数17】

20※とができる。

【0155】

【数18】

40 第2項は以下のように表される。なお、(数19)に示す式と(数20)に示す式とは併せて連続して展開される式を示す。

【0158】

【数19】

$$\begin{aligned}
& \int_t \int_z \sin ku \sin kv \left[-\frac{1}{r^3} \right] e^{-jkd} dz dt \\
&= - \int_t \int_z \left[ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[kv - \frac{(kv)^3}{6} \right] \\
&\quad [\cos kd - j \sin kd] \frac{1}{r^3} dz dt \\
&= - \int_t \int_z \left[\left[ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[kv - \frac{(kv)^3}{6} \right] \left[1 - \frac{(kd)^2}{2} \right] \right. \\
&\quad \left. - j \left[ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[kv - \frac{(kv)^3}{6} \right] \right. \\
&\quad \left. \left[kd - \frac{(kd)^3}{6} \right] \right] \frac{1}{r^3} dz dt
\end{aligned}$$

【0159】

$$\begin{aligned}
&= - \int_t \int_z \left[uvk^2 - \frac{u^3v + uv^3 + 3uvd^2}{6} k^4 \right. \\
&\quad \left. + \frac{u^3v^3 + 3u^3vd^2 + 3uv^3d^2}{36} k^6 - \frac{u^3v^3d^2}{72} k^8 \right. \\
&\quad \left. - j \left[uvdk^3 - \frac{u^3vd + uv^3d + uvd^3}{6} k^5 \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{u^3v^3d + u^3vd^3 + uv^3d^3}{36} k^7 - \frac{u^3v^3d^3}{216} k^9 \right] \right] \frac{1}{r^3} dz dt
\end{aligned}$$

【0160】ここで、式を簡潔な形にするために、 k^2 等の項の係数をP1～P8に書き換えると、上式は以下のよう表される。

$$P1k^2 + P2k^4 + P3k^6 + P4k^8 + j(P5k^3 + P6k^5 + P7k^7 + P8k^9)$$

次に、相互リアクションB13の右辺第1項も、同様に以

下のように表される。なお、(数21)に示す式と(数22)に示す式とは併せて連続して展開される式を示す。

【0161】

【数21】

$$\int_t \int_z \sin ku \sin kv \left[-\frac{jk}{r^2} \right] e^{-jkd} dz dt$$

$$= - \int_t \int_z \left[uvk^2 - \frac{u^3v + uv^3 + 3uvd^2}{6} k^4 \right. \\ \left. + \frac{u^3v^3 + 3u^3vd^2 + 3uv^3d^2}{36} k^6 - \frac{u^3v^3d^2}{72} k^8 \right]$$

$$- j \left[uvdk^3 - \frac{u^3vd + uv^3d + uvd^3}{6} k^5 \right.$$

$$\left. + \frac{u^3v^3d + u^3vd^3 + uv^3d^3}{36} k^7 - \frac{u^3v^3d^3}{216} k^9 \right] \frac{jk}{r^2} dz dt$$

【0162】

* * 【数22】

$$= - \int_t \int_z \left[uvdk^4 - \frac{u^3vd + uv^3d + uvd^3}{6} k^6 \right.$$

$$\left. + \frac{u^3v^3d + u^3vd^3 + uv^3d^3}{36} k^8 - \frac{u^3v^3d^3}{216} k^{10} \right]$$

$$+ j \left[uvk^3 - \frac{u^3v + uv^3 + 3uvd^2}{6} k^5 \right.$$

$$\left. + \frac{u^3v^3 + 3u^3vd^2 + 3uv^3d^2}{36} k^7 - \frac{u^3v^3d^2}{72} k^9 \right] \frac{1}{r^2} dz dt$$

【0163】ここで、式を簡潔な形にするために、 k^2 等の項の係数をQ1~Q8に書き換えると、上式は以下のうに表される。

$$Q1k^4 + Q2k^6 + Q3k^8 + Q4k^{10} + j(Q5k^3 + Q6k^5 + Q7k^7 + Q8k^9)$$

ゆえに、相互リアクションB13は以下のように表される。

$$40 \times B13 = (hl \sin \phi l / 4 \pi \sin kd \sin kd3) e^{-jkr0} \times [P1k^2 + P2k^4 + P3k^6 + P4k^8 + j(P5k^3 + P6k^5 + P7k^7 + P8k^9) + Q1k^4 + Q2k^6 + Q3k^8 + Q4k^{10} + j(Q5k^3 + Q6k^5 + Q7k^7 + Q8k^9)]$$

ここで、上式に近似値 $\sin kd \sin kd3 \approx d1d3k^2$ を代入すると、相互リアクションB13は以下のように表される。

※

$$B13 = (hl \sin \phi l / 4 \pi d1d3) e^{-jkr0} \times$$

$$[P1 + (P2 + Q1)k^2 + (P3 + Q2)k^4 + (P4 + Q3)k^6 + Q4k^8$$

$$+ j[(P5 + Q5)k + (P6 + Q6)k^3 + (P7 + Q7)k^5 + (P8 + Q8)k^7]]$$

$$= e^{-jkr0} [R1 + R2k^2 + R3k^4 + R4k^6 + R5k^8]$$

相互リアクションB14についても同様にして求めることができる。即ち、相互リアクションB14は以下のように表される。

$$B14 = e^{-jkx_0} [S1 + S2k^2 + S3k^4 + S4k^6 + S5k^8 + j(S6k + S7k^3 + S8k^5 + S9k^7)]$$

ゆえに、相互リアクション (B13+B14) は、以下のよう表される。

$$[0164] \quad B13+B14 = e^{-jkx_0} [C1 + C2k^2 + C3k^4 + C4k^6 + C5k^8 + j(C6k + C7k^3 + C8k^5 + C9k^7)]$$

相互リアクション (B23+B24) についても同様にして求めることができる。B23はモノポール②とモノポール③の相互リアクションであり、B24はモノポール②とモノポール④の相互リアクションである。

【0165】従って、相互インピーダンス (B13+B14+B23+B24) も、上式と同様に、波数kの多項式により表すことができる。

(モーメント法の連立方程式の拡大) 前述のように、例えば相互インピーダンスZijについてのモーメント法の連立方程式の代表的なものは $[Zij] [Ii] = [Vi]$ である。この連立方程式に求めた相互インピーダンスZijが代入され、各要素を流れる電流の値Iiが求められる。

【0166】しかし、電磁流計算処理部10において用いられるモーメント法の連立方程式は上述のものに限られない。換言すれば、前述の近似式を用いて求めた相互インピーダンス等の近似値は、種々の形のモーメント法の連立方程式に適用できる。即ち、そのまま代入できる。電磁流計算処理部10は、以下に述べるように電気回路装置を分割した各要素の種類に応じて、種々のモーメント法の連立方程式を用いて電流の値Iiを求める。

【0167】解析対象となる電気回路装置の構造情報に基づいて、入力処理部1は、電気回路装置の構造体をメッシュに分割する。例えば、金属のワイヤ部分については線分割することにより、ワイヤのダイポールを生成する。金属や誘電体の面部分については面分割することにより、サーフェスパッチのダイポールを生成する。また、必要に応じてその他の形状のダイポールを生成する。

【0168】続いて、分割した金属同士の相互インピーダンス $Z^{\circ}_{c,c}$ 、分割した金属と誘電体との相互インピーダンス $Z^{\circ}_{c,a} / Z^{\circ}_{a,c}$ 、分割した誘電体同士の相互インピーダンス $Z^{\circ}_{a,a} / Z^{\circ}_{a,a}$ 、分割した誘電体同士の相互アドミッタンス $Y^{\circ}_{a,a} / Y^{\circ}_{a,a}$ 、分割した金属と誘電体との相互リアクション $B^{\circ}_{c,a} / B^{\circ}_{a,c}$ 、及び、分割した誘電体同士の相互リアクション $B^{\circ}_{a,a} / B^{\circ}_{a,a}$ とが算出される。従って、実際の電気回路装置の解析においては、相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションが全て求められ

$$+j(R6k + R7k^3 + R8k^5 + R9k^7)]$$

る。

【0169】ここで、肩付き文字“0”は空気中での計算値を表し、肩付き文字“d”は誘電体中での計算値を表し、添え字“c”は金属を表し、添え字“d”は誘電体を表し、添え字“c,c”は、金属から金属への相互関係を表し、添え字“d,d”は、誘電体から誘電体への相互関係を表し、添え字“c,d”は、誘電体から金属への相互関係を表し、添え字“d,c”は、金属から誘電体への相互関係を表している。

【0170】サンプリング周波数における相互インピーダンス等は、サンプル計算処理部4において、周知の計算処理によって算出される。周波数範囲内の所定の周波数 (例えば高調波成分) における相互インピーダンス等は、近似計算処理部9において、本発明により近似式を用いた計算処理によって算出される。

【0171】続いて、入力処理部1又は電磁流計算処理部10において、モーメント法の連立方程式が設定される。どのような式を設定するかは、2個の要素であるダイポールの種類により、予め定められる。

【0172】プリント板に存在する波源 V_i と、分割した金属に流れる電流の大きさを表す係数 $I_{c,n}$ と、分割した誘電体の表面に流れる等価電流の大きさを表す係数 $I_{a,n}$ と、分割した誘電体の表面に流れる等価磁流の大きさを表す係数 M_n とを用いて、以下のモーメント法の連立方程式が設定される。なお、「[]」はマトリクスを表す。

【0173】金属の表面電界値がゼロを示すという境界条件からは次のモーメント法の連立方程式が設定される。

$$[Z^{\circ}_{c,c}] [I_{c,n}] + [Z^{\circ}_{c,a}] [I_{a,n}] + [B^{\circ}_{c,a}] [M_n] = [V_i]$$

誘電体の境界面の両側で電界の接線成分が等しいという境界条件からは次のモーメント法の連立方程式が設定される。

$$[0174] \quad [Z^{\circ}_{a,c}] [I_{c,n}] + [Z^{\circ}_{a,a} + Z^{\circ}_{a,a}] [I_{a,n}] + [B^{\circ}_{a,a} + B^{\circ}_{a,a}] [M_n] = [0]$$

誘電体の境界面の両側で磁界の接線成分が等しいという境界条件からは次のモーメント法の連立方程式が設定される。

$$[0175] \quad [B^{\circ}_{a,c}] [I_{c,n}] + [B^{\circ}_{a,a} + B^{\circ}_{a,a}] [I_{a,n}] + [-Y^{\circ}_{a,a} - Y^{\circ}_{a,a}] [M_n] = [0]$$

以上をまとめると、図8(A)に示すモーメント法の連立方程式が設定される。なお、このモーメント法の連立方程式の設定にあたって、ケーブルにコモンモード電流の低減化を実現するコアが挿入されるときには、そのケーブルの持つ相互インピーダンス $Z^{\circ}_{c,c}$ をそのコアのインピーダンスZLに減じる必要がある。従って、この

場合、モーメント法の連立方程式は図 8 (B) に示すように変形される。

【0176】また、反射波を生成する大地面があるときには、反射波を生成する構造体イメージを生成するとともに、その構造体イメージに対して実像とは同じ大きさを持つ逆向きの電磁流を想定する。そして、図 9 (A) に示すような実像間のモーメント法のマトリクスを算出するとともに、図 9 (B) に示すような実像とイメージとの間のモーメント法のマトリクスを算出して、この 2 つのマトリクスを使って、図 9 (C) に示すモーメント法の連立方程式を設定する。

【0177】イメージが理論的には実像に対して負の極性を持つことを利用して、イメージ電流を実像電流に対して負の極性を持つもので表すという反射波処理を行うことによって、未知数の増加を避けることができるので、計算時間は概略 2 倍程度で済む。これに対して、イメージ電流を未知数として扱う場合、未知数が 2 倍となるので、計算時間も概略 4 倍となる。従って、この反射波処理を行うことにより、近似計算と併せて更に高速処理が実現できる。

【0178】電磁流計算処理部 10 は、以上のように設定したモーメント法の連立方程式に、近似計算によって求めた相互インピーダンス等を代入して、この連立方程式を解く。即ち、プリント板の持つ金属に流れる電流、プリント板の持つ誘電体の表面に流れる等価電流／等価磁流、ケーブルやワイヤやリードに流れる電流（コモンモード電流も含む）、金属筐体や金属構造物に流れるコモンモード電流等を算出する。

【0179】

【実施例】本発明の有効性を検証するため、本発明による電磁界強度算出装置 20 によって求めた相互インピーダンスの値と、モーメント法による計算を実行する電磁界強度算出装置によって求めた相互インピーダンスの値とを、互いに比較して誤差を調べる。本発明による相互インピーダンスの値は、LU 分解法により連立方程式を解いて求めた近似係数を代入した近似式によって求めた。

【0180】図 10 は誤差の比較のために用いた周波数を示す。なお、図 10 において、各周波数に対応する波数 k の値を示した。サンプリング周波数は 5 個とした。従って、 $n=5$ である。即ち、相互インピーダンス Z_{ij} についての近似式は、 $Z_{ij} = \exp(-jkr) [a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7)]$ を用いた。5 個のサンプリング周波数 f_{s1} 、 f_{s2} 、 f_{s3} 、 f_{s4} 及び f_{s5} は、各々、30MHz ($3e+007$ 即ち、 3×10^7)、250MHz、500MHz、750MHz 及び 1GHz とした。これは、周波数範囲が 30MHz \sim 1GHz である場合に相当する。5 個のサンプリング周波数における相互インピーダンス Z_{ij} は、サンプル計算処理部 4 において、モーメン

ト法において用いられる周知の計算処理によって求められる。

【0181】近似式を用いた計算により相互インピーダンス Z_{ij} を求める周波数 f は、100MHz ($1e+008$ 即ち、 1×10^8) とした。この周波数における相互インピーダンス Z_{ij} は、比較のために、モーメント法において用いられる周知の計算処理と本発明による近似式及び近似係数を用いた計算処理との双方によって求められる。

10 【0182】また、この比較試験におけるモノポールの構造は図 11 に示す構造を想定した。この構造は図 6 に示す構造と同一である。この比較試験では、モノポール①及び②は変化せず図中左端のモノポールとされる。一方、モノポール③及び④は図中 #1 乃至 #6 の何れかが選択される。これにより、モノポール間の距離 r が変更される。図 11 においては各モノポール間の距離を等しく表したが、モノポール①及び②とモノポール #1 との距離は 0.0001m (メートル)、モノポール #2 との距離は 0.001m、モノポール #3 との距離は 0.01m、モノポール #4 との距離は 0.1m、モノポール #5 との距離は 1m、モノポール #6 との距離は 10m とした。モノポールであるワイヤの直径は $2 \mu m$ とした。また、モノポールの各々の長さは 0.03m とした。

20 【0183】図 12 はダイポール間の距離 $r=0m$ である場合の相互インピーダンス Z_{ij} の計算値を示す。なお、距離 $r=0m$ であるから、正確には、図 12 はモノポール①及び②についての自己インピーダンスを近似式を用いた計算により算出した値等を示す。本明細書においては、相互インピーダンスは自己インピーダンスをも含む概念である。

30 【0184】図 12 の近似係数の欄において、 c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 及び c_4 は、各々、前述の近似式の実数部における近似係数 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 及び a_4 の計算値を示す。 m_0 、 m_1 、 m_2 、 m_3 及び m_4 は、各々、前述の近似式の虚数部における近似係数 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 及び b_4 の計算値を示す。なお、図 12 における c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 及び c_4 は、先に示した相互リアクションの近似式において用いられている近似係数とは異なるものであり区別される。

40 【0185】近似係数 $c_0 \sim c_4$ 及び $m_0 \sim m_4$ は、前述の 5 個のサンプリング周波数等を用いて、近似係数算出処理部 5 において求められる。近似係数 $c_0 \sim c_4$ 及び $m_0 \sim m_4$ は、本発明に従って、LU 分解法によって当該近似式からなる連立方程式を解いて求めた。即ち、式④及び式⑤の計算により求めた。

50 【0186】図 12 において、各近似係数に波数 k の巾乗を掛けた値を示した。例えば、 $c_1 * k^2$ は近似係数 c_1 に波数 k の 2 乗を掛けた値を示す。波数 k の値は、式 $k = 2\pi f / c$ に解析の対称である周波数 $f = 100MHz$ を代入することにより求めた。近似係数に波数 k の巾乗を掛けた値は、近似係数に周波数 f の巾乗を掛けた値

と同様の意味を持つ。図13乃至図18においても同様である。

【0187】指数部の欄に近似式における $e^{-j\omega r}$ の値を示す。指数部の欄において、括弧内のカンマで区別した前半に実数部の値を示し、後半に虚数部の値を示す。近似値の欄に本発明の近似式によって算出した相互インピーダンスの値を示す。近似値の欄において、括弧内のカンマで区別した前半に実数部の値を示し、後半に虚数部の値を示す。以上の値は近似計算処理部9において求められる。図13乃至図18においても同様である。

【0188】モーメント法の欄に従来のモーメント法によって算出した相互インピーダンスの値を示す。モーメント法の欄において、括弧内のカンマで区別した前半に実数部の値を示し、後半に虚数部の値を示す。これらの値は従来の電磁界強度算出装置において求めたものである。図13乃至図18においても同様である。

【0189】誤差の欄に従来のモーメント法によって算出した相互インピーダンスの値と本発明の近似式によって算出した相互インピーダンスの値との間の誤差を示す。誤差の欄において、点線で区別した前半に実数部の誤差を示し、後半に虚数部の誤差を示す。

【0190】モーメント法の欄に示す値と近似値の欄に示す値との比較から判るように、両者の値は極めて近似している。そして、誤差の欄に示すように、有効数字の小数点以下5桁までの誤差を求めると、その値は0%となる。従って、極めて優れた近似であること、及び、LU分解法が近似係数の算出処理に適式であることが判る。

【0191】図13はダイポール間の距離 $r=0.0001\text{m}$ である場合、図14はダイポール間の距離 $r=0.001\text{m}$ である場合、図15はダイポール間の距離 $r=0.01\text{m}$ である場合について示す。図示のように、これらの場合も、有効数字の小数点以下5桁までの誤差は0%である。周波数100MHzである場合、距離0.01m以下においては誤差がないと考えて良い。

【0192】図16はダイポール間の距離 $r=0.1\text{m}$ である場合、図17はダイポール間の距離 $r=1\text{m}$ である場合、図18はダイポール間の距離 $r=10\text{m}$ である場合について示す。図16乃至図18に示す場合においては、図示のような誤差が発生している。周波数100MHzである場合、誤差のピークは $r=0.1\text{m}$ にある。誤差は、図から判るように、ダイポール間の距離 r が大きくなるにつれて拡大することなく収束する。従って、この点からも極めて優れた近似であること、及び、LU分解法が近似係数の算出処理に適式であることが判る。

【0193】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、解析対象となる電気回路装置の放射する電磁界強度を算出する電磁界強度算出装置において、相互インピーダン

ス等を近似係数と周波数の巾乗との積からなる多項式と言う極めて簡潔な形の近似式によって表し、この近似係数をLU分解法により求めると共に、前記近似式によって各周波数毎に相互インピーダンス等を求めることにより、前記近似式からなる連立方程式を高速で解くことができるので、相互インピーダンス等を求める処理を極めて短時間で行うことができ、この結果、電界及び磁界の算出に要する時間の大部分を占めていた相互インピーダンス等の算出を極めて短時間で行って電磁界強度の算出を極めて短時間で行うことができ、規制周波数帯域内にある多くの高調波成分について解析する場合でも電磁界強度の算出を極めて短時間で行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の原理構成図である。

【図2】電磁界強度算出装置構成図である。

【図3】LU分解法による近似係数算出処理フローである。

【図4】通常処理による近似係数算出処理フローである。

【図5】電磁界強度算出処理フローである。

【図6】近似式の前提の説明図である。

【図7】近似式の前提の説明図である。

【図8】モーメント法の連立方程式の説明図である。

【図9】反射波処理の説明図である。

【図10】実施例の前提説明図である。

【図11】実施例の前提説明図である。

【図12】近似結果説明図である。

【図13】近似結果説明図である。

【図14】近似結果説明図である。

【図15】近似結果説明図である。

【図16】近似結果説明図である。

【図17】近似結果説明図である。

【図18】近似結果説明図である。

【図19】従来技術説明図である。

【図20】本発明の背景説明図である。

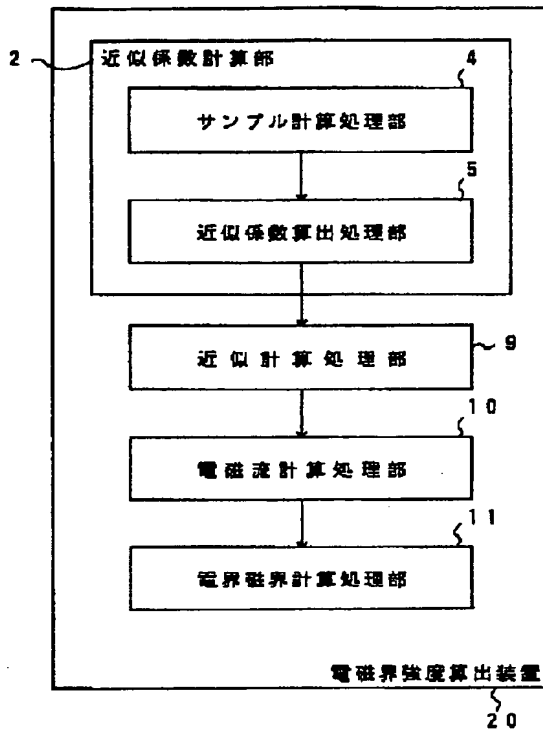
【図21】本発明の背景説明図である。

【符号の説明】

- 1 入力処理部
- 2 近似係数計算部
- 3 サンプル指定処理部
- 4 サンプル計算処理部
- 5 近似係数算出処理部
- 6 データファイル
- 7 インピーダンスファイル
- 8 係数ファイル
- 9 近似計算処理部
- 10 電磁流計算処理部
- 11 電界磁界計算処理部
- 12 出力ファイル

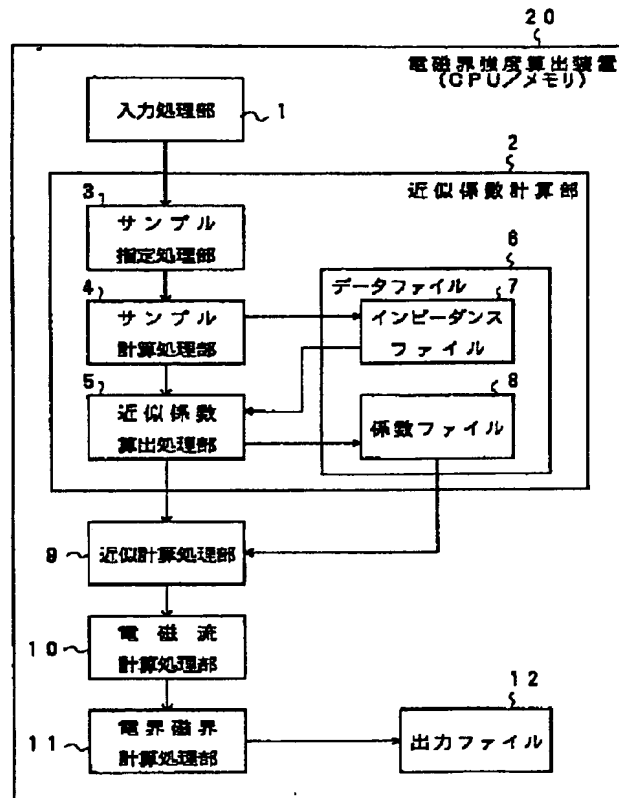
【図1】

本発明の原理構成図



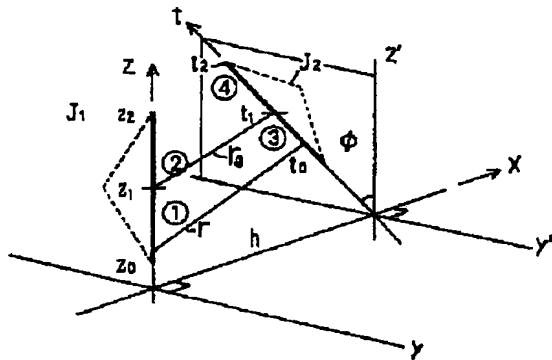
【図2】

電磁界強度算出装置構成図



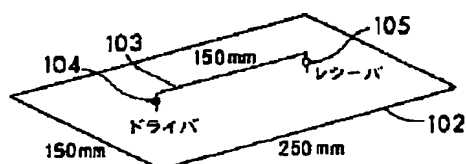
【図6】

近似式の前提の説明図



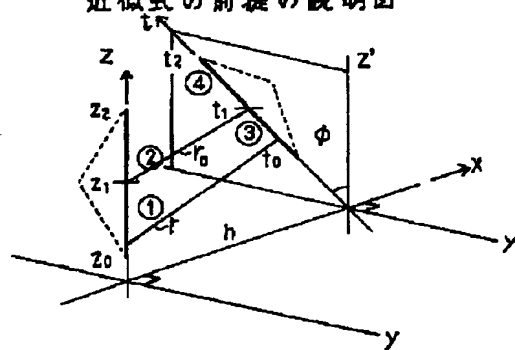
【図20】

本発明の背景説明図



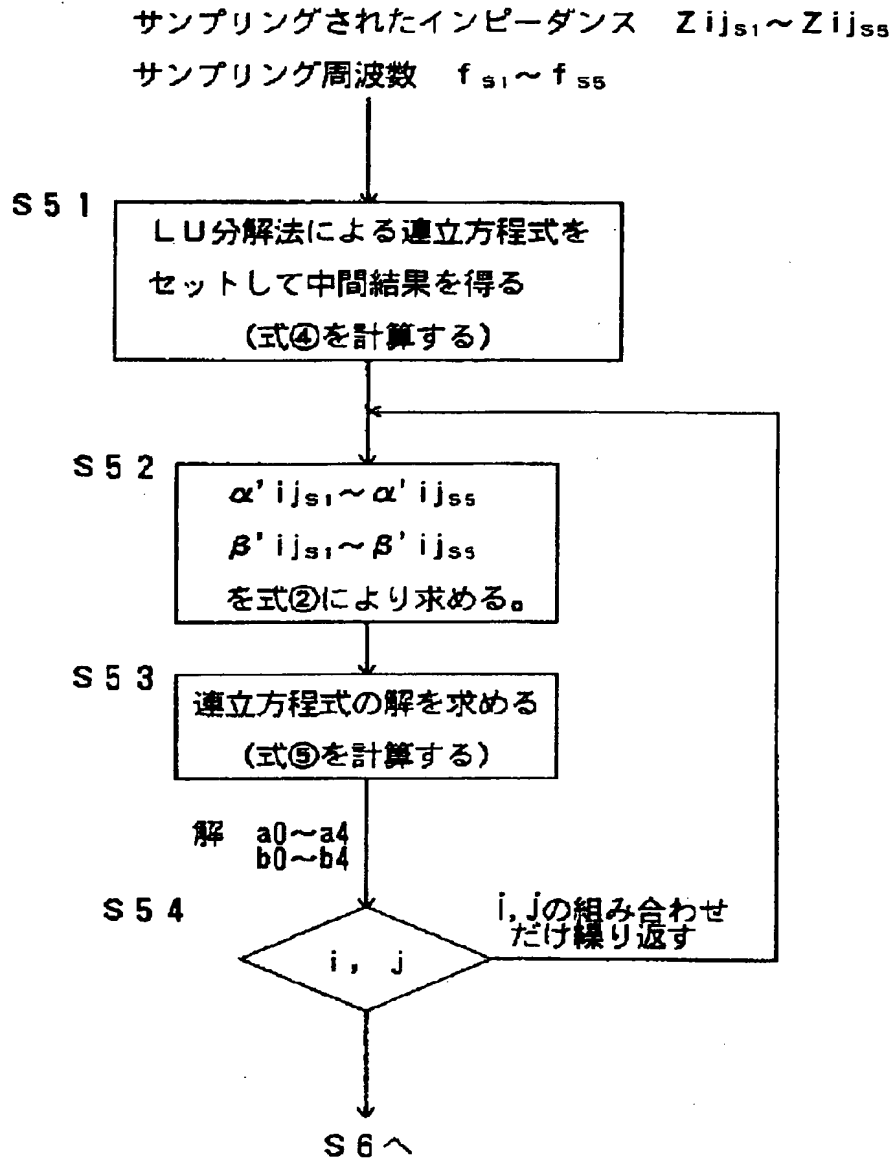
【図7】

近似式の前提の説明図



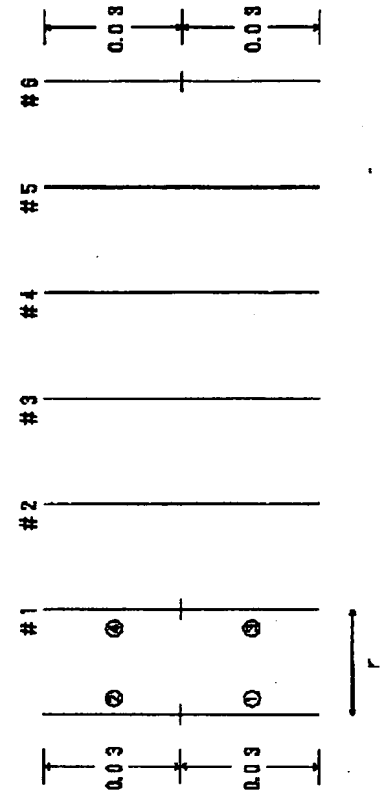
【図3】

LU分解法による近似係数算出処理フロー



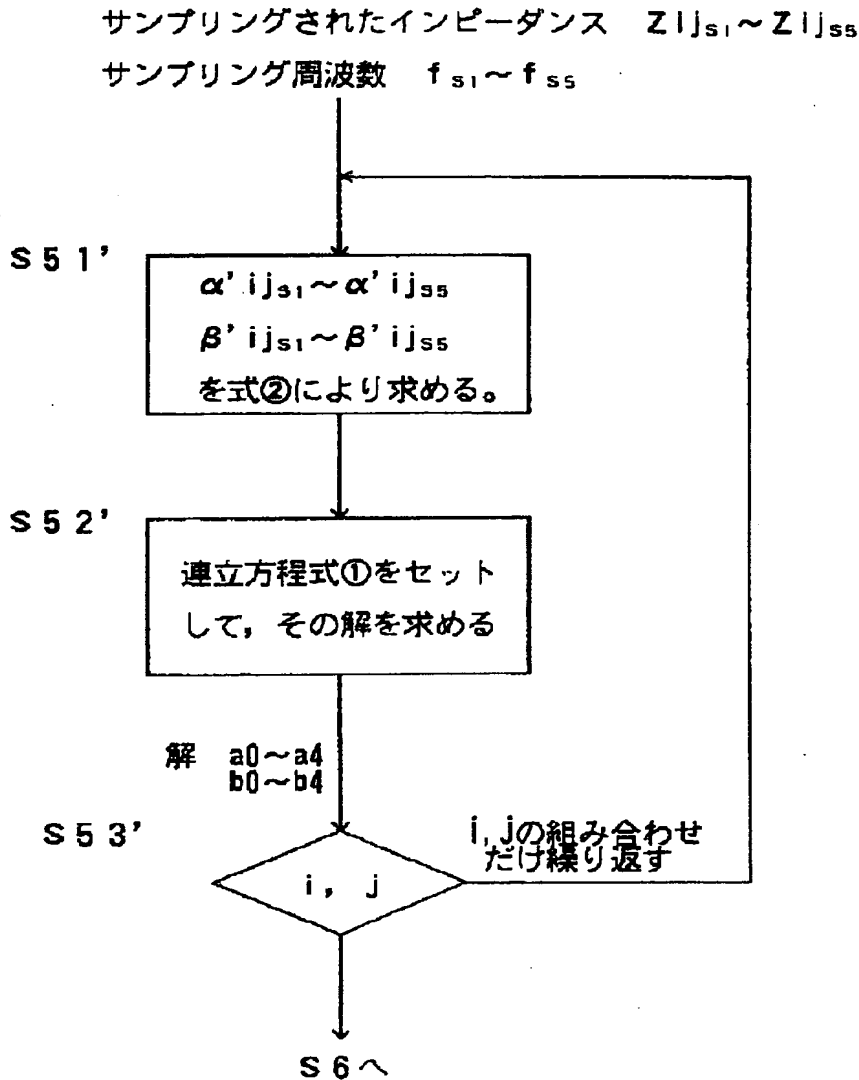
【図11】

実施例の前提説明図



【図4】

通常の処理による近似係数算出処理フロー



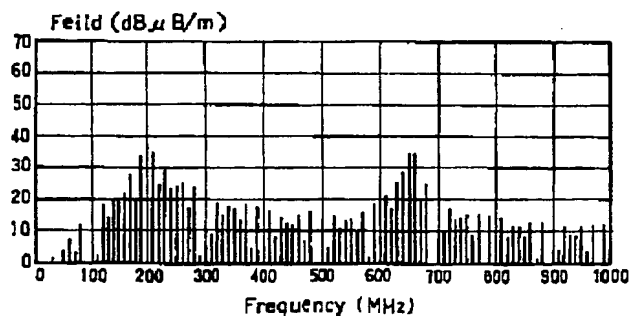
【図10】

【図21】

実施例の前提説明図

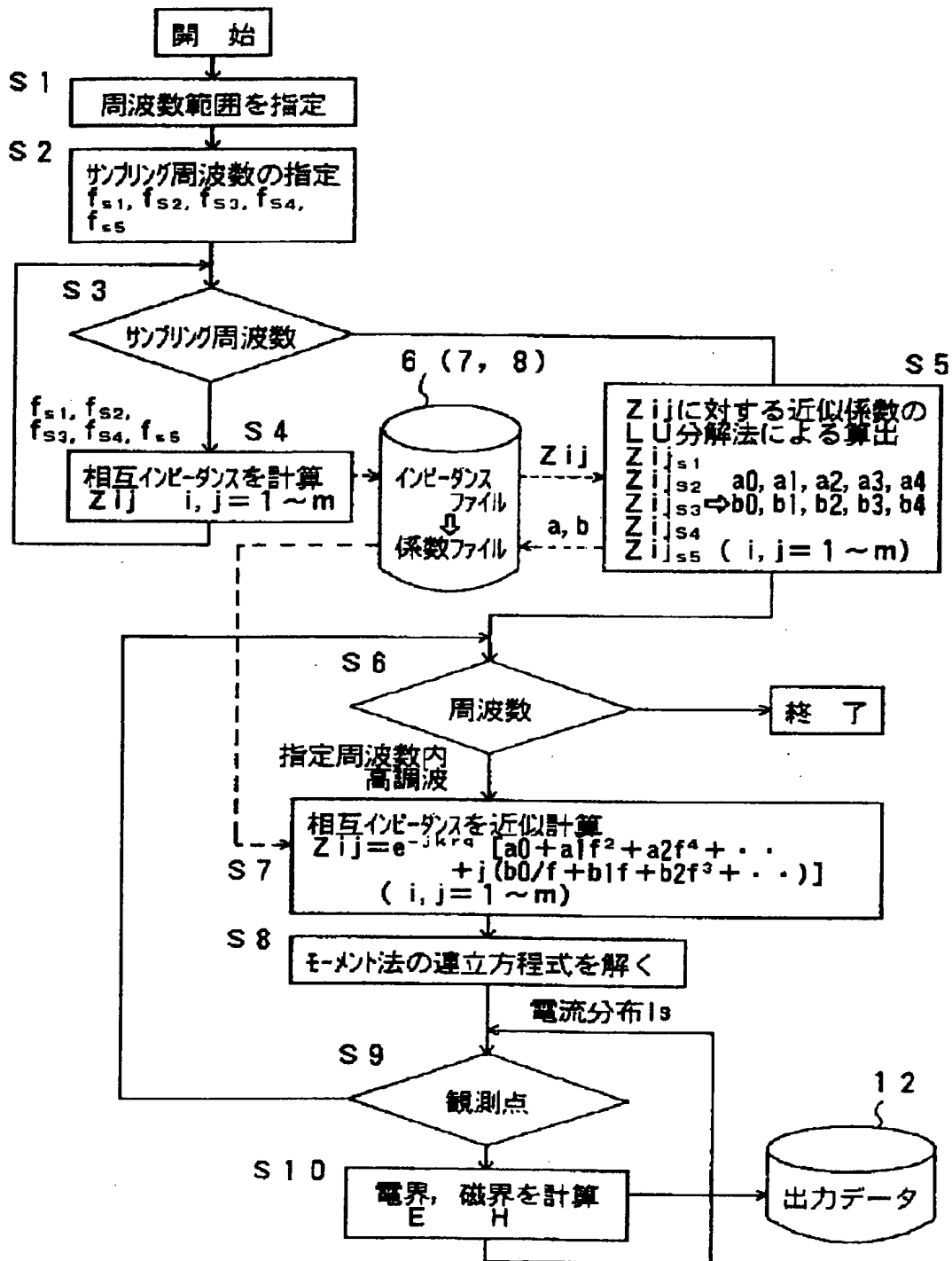
	周波数 f Hz	波数 $k = \frac{2\pi f}{c}$
サンプル周波数	$f = 3e+007$	$k = 0.828753$
	$f = 2.5e+008$	$k = 5.23961$
	$f = 5e+008$	$k = 10.4792$
	$f = 7.5e+008$	$k = 15.7188$
	$f = 1e+009$	$k = 20.9584$
近似する周波数	$f = 1e+008$	$k = 2.09584$

本発明の背景説明図



【図5】

電磁界強度算出処理フロー



【図8】

モーメント法の連立方程式の説明図

$$\begin{bmatrix} Z^0 c, c \\ Z^0 d, c \\ B^0 d, c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z^0 c, d \\ Z^0 d, d + Z^a d, d \\ B^0 d, d + B^a d, d - Y^a d, d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B^0 c, d \\ B^0 d, d + B^a d, d \\ Y^0 d, d - Y^a d, d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I c, n \\ I d, n \\ M n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Z^0 c, c - Z^a c, d \\ Z^0 d, c \\ B^0 d, c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z^0 c, d \\ Z^0 d, d + Z^a d, d \\ B^0 d, d + B^a d, d - Y^a d, d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B^0 c, d \\ B^0 d, d + B^a d, d \\ Y^0 d, d - Y^a d, d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I c, n \\ I d, n \\ M n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(A)

(B)

【図12】

近似結果説明図

r = 0m		r = 0m	
実数部	c0 = 4.41204030853569e-010 c1 = 1.79875420324100e-002 c2 = 2.15853378947458e-008 c3 = 2.53898602224114e-010 c4 = 3.14139185825842e-014	虚数部	c1k~2 = 7.901147831435932e-002 c2k~4 = 4.164868660122004e-005 c3k~8 = 2.150185278809844e-008 c4k~8 = 1.185485619284607e-011
近似係数	m0/k = -3.0777568496823e+004 m1/k = 9.6331050183204355e+000 m2 = 6.522599901706558e-004 m3 = 6.0258052130304e-008 m4 = 6.30287330212078e-012	近似係数	m0/k = -1.468513245097980e+004 m1/k = 2.018937706030059e+001 m2k~3 = 6.00484882250323e-003 m3k~5 = 2.438778185195023e-008 m4k~7 = 1.119541317378881e-009
指数部		指数部	
eijkm = (1, 0)		eijkm = (1, 0)	
モーメント法 (実数部, 虚数部)		モーメント法 (実数部, 虚数部)	
(7.905315245501043e-002, -1.468493706823832e+004)		(7.905315245501043e-002, -1.468493706823832e+004)	
近似値 (実数部, 虚数部)		近似値 (実数部, 虚数部)	
(7.905314895555282e-002, -1.468493706855871e+004)		(7.905314895555282e-002, -1.468493706855871e+004)	
誤差 (実数部, 虚数部)		誤差 (実数部, 虚数部)	
(-0.00000 %, 0.00000 %)		(-0.00000 %, 0.00000 %)	

【図13】

近似結果説明図

r = 0.0001m		r = 0.0001m	
実数部	c0 = 1.882208319840559e+000 c1 = 1.738291158321004e-002 c2 = 2.114063219235820e-008 c3 = 2.455181976375382e-010 c4 = 3.098303709201438e-014	虚数部	c1k~2 = 7.635555829219723e-002 c2k~4 = 4.080561255323418e-005 c3k~6 = 2.114722185984481e-008 c4k~8 = 1.152702314650377e-011
近似係数	m0/k = -1.882208319840559e+004 m1 = 6.048438940227548e+000 m2 = 4.374819826465934e-004 m3 = 4.188420243198447e-008 m4 = 4.51595083989389e-012	近似係数	m0/k = -8.980686382378434e+003 m1/k = 1.267235693728558e+001 m2k~3 = 4.027388857038723e-003 m3k~5 = 1.633736051119280e-008 m4k~7 = 8.021634586303198e-010
指数部		指数部	
eijkm = (1, -0.000205584)		eijkm = (1, -0.000205584)	
モーメント法 (実数部, 虚数部)		モーメント法 (実数部, 虚数部)	
(7.905315176275969e-002, -8.987990789659779e+003)		(7.905315176275969e-002, -8.987990789659779e+003)	
近似値 (実数部, 虚数部)		近似値 (実数部, 虚数部)	
(7.905314828253812e-002, -8.98799078988676e+003)		(7.905314828253812e-002, -8.98799078988676e+003)	
誤差 (実数部, 虚数部)		誤差 (実数部, 虚数部)	
(-0.00000 %, 0.00000 %)		(-0.00000 %, 0.00000 %)	

【図9】

反射波処理の説明図

$$[M] = \begin{bmatrix} Z^0 c, c & Z^0 c, d & B^0 c, d \\ Z^0 d, c & Z^0 d, d + Z^d d, d & B^0 d, d + B^d d, d \\ B^0 d, c & B^0 d, d + B^d d, d - Y^0 d, d & Y^d d, d \end{bmatrix} \quad (A)$$

$$[M'] = \begin{bmatrix} Z^0 c, c' & Z^0 c, d' & B^0 c, d' \\ Z^0 d, c' & Z^0 d, d' + Z^d d, d' & B^0 d, d' + B^d d, d' \\ B^0 d, c' & B^0 d, d' + B^d d, d' - Y^0 d, d' & Y^d d, d' \end{bmatrix} \quad (B)$$

$$[[M] - [M']] \begin{bmatrix} I_{c,n} \\ I_{d,n} \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (C)$$

【図14】

所定数値算出図

$r = 0.001a$	
実数部	$c0 = 9.788085268375381e+000$
虚数部	$c1k^{-2} = 8.434095560851029e-002$
	$c2k^{-4} = 3.653190873218709e-005$
	$c3k^{-6} = 1.918082431841298e-008$
	$c4k^{-8} = 1.053547781790458e-011$
係数部	$m0/k = -4.674041602315520e+003$
	$m1k = 7.006657535046640e+000$
	$m2k^{-3} = 2.547625258060237e-003$
	$m3k^{-5} = 1.138123250733048e-006$
	$m4k^{-7} = 5.633864844083232e-010$
指数部	$ejkr = (0.99998, -0.00209584)$
モーメント法 (実数部, 虚数部)	$(7.905308300498604e-002, -4.667042811588252e+003)$
近似値 (実数部, 虚数部)	$(7.905307949749490e-002, -4.667042811839987e+003)$
誤差 (実数部, 虚数部)	$(-0.00000 \%, 0.00000 \%)$

【図16】

所定数値算出図

$r = 0.1a$	
実数部	$c0 = 2.082951327198163e+001$
虚数部	$c1k^{-2} = -1.261541187274594e-002$
	$c2k^{-4} = -7.67748626537654e-005$
	$c3k^{-6} = -1.844650382103781e-007$
	$c4k^{-8} = -2.929182185201639e-009$
係数部	$m0/k = -9.813050133154546e+001$
	$m1k = 1.877909137744578e+000$
	$m2k^{-3} = 4.65012183657927e-003$
	$m3k^{-5} = 9.822146450851678e-006$
	$m4k^{-7} = 1.48998488048082e-007$
指数部	$ejkr = (0.97817, -0.298053)$
モーメント法 (実数部, 虚数部)	$(7.880575546808622e-002, -9.872425083070460e+001)$
近似値 (実数部, 虚数部)	$(7.883910549589258e-002, -9.872461865453820e+001)$
誤差 (実数部, 虚数部)	$(-0.0033 \%, 0.0037 \%)$

【図15】

所定数値算出図

$r = 0.01a$	
実数部	$c0 = 2.201363234833243e+001$
虚数部	$c1k^{-2} = 3.187805287798781e-002$
	$c2k^{-4} = 1.971976883821714e-005$
	$c3k^{-6} = 1.039875017648482e-008$
	$c4k^{-8} = 5.87035276322238e-012$
係数部	$m0/k = -1.050348548524070e+003$
	$m1k = 2.402688258148782e+000$
	$m2k^{-3} = 1.218320426385131e-003$
	$m3k^{-5} = 6.205862137587253e-007$
	$m4k^{-7} = 3.3675055353056820e-010$
指数部	$ejkr = (0.99978, -0.0209569)$
モーメント法 (実数部, 虚数部)	$(7.904620743561184e-002, -1.048174497088937e+003)$
近似値 (実数部, 虚数部)	$(7.904620355063421e-002, -1.048174497186659e+003)$
誤差 (実数部, 虚数部)	$(-0.00000 \%, 0.00000 \%)$

【図17】

所定数値算出図

$r = 1a$	
実数部	$c0 = 2.698356731101072e-002$
虚数部	$c1k^{-2} = 2.187010991895291e-005$
	$c2k^{-4} = 9.005738237640307e-007$
	$c3k^{-6} = -1.631147820943212e-008$
	$c4k^{-8} = 8.995244043447423e-011$
係数部	$m0/k = -1.286595385819213e-002$
	$m1k = 5.65355198412514e-002$
	$m2k^{-3} = 3.540498286156757e-005$
	$m3k^{-5} = 5.510894184637699e-008$
	$m4k^{-7} = -1.772474475216713e-010$
指数部	$ejkr = (-0.501255, -0.8853)$
モーメント法 (実数部, 虚数部)	$(2.428099537351224e-002, -4.525881718889142e-002)$
近似値 (実数部, 虚数部)	$(2.428331866825049e-002, -4.525745320153134e-002)$
誤差 (実数部, 虚数部)	$(0.03465 \%, 0.0014 \%)$

【図18】

近似値算出説明図

$r = 10m$	
実数	$c0 = 2.898183188909788e-004$
近位係数	$c1 \times 10^{-2} = 2.115007839498025e-007$
	$c2 \times 10^{-4} = 9.893268897949209e-009$
	$c3 \times 10^{-6} = -1.846885153325278e-010$
	$c4 \times 10^{-8} = 1.021255229172552e-012$
係数	$m0/k = -1.287453374297772e-005$
係数	$m1 \times 10^{-3} = 5.656851455096689e-003$
係数	$m2 \times 10^{-3} = 3.724106995873941e-008$
係数	$m3 \times 10^{-5} = 2.116141189187004e-009$
係数	$m4 \times 10^{-7} = 9.893076587835843e-013$
係数部	$v/krm = (-0.512501, -0.958687)$
モーメント法 (実数部, 虚数部)	$(4.709468871392880e-003, -3.125336245315634e-003)$
近似値 (実数部, 虚数部)	$(4.709495923782538e-003, -3.125305180588807e-003)$
誤差 (実数部, 虚数部)	$(0.00058 \%, -0.00099 \%)$

【図19】

従来技術説明図

